Die Strom- und Spannungsoberwellen im schlesischen Reichsbahnnetz

Von der
Technischen Hochschule zu Breslau
zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte
Dissertation

Vorgelegt von
Reichsbahnbaumeister Dipl.-Ing. Ottomar Kasperowski
in Breslau

Referent: Prof. Dr.-Ing. Hilpert
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Euler

Mündliche Prüfung: 7. 7. 1932

VERLAG REIMAR HOBBING / BERLIN

Inhaltsangabe

Seite

Einleitung 3

A. Aufbau und Auswertung der Versuche 3

B. Die Oberwellen niedriger Frequenz 4

1. Ursachen der Oberwellen 4
2. Einfluß der einzelnen Netzglieder auf die Form der Strom- und Spannungskurven 4
3. Prozentuale und effektive Werte der Oberwellen im Betriebsnetz 12

C. Die Oberwellen höherer Frequenz 14

D. Der störende Einfluß der Oberwellen 14

1. Leistung und Kommutierung der Motoren 14
2. Beeinflussung benachbarter Stromkreise 14
3. Einleitung von Kurzschlüssen 15

E. Die Beseitigung der Oberwellen 15

1. Auslastung der Transformatoren 15
2. Herabsetzung der Netzspannung 15
3. Verbesserungsmaßnahmen an den Motoren 16
4. Die Aussiebung von Oberwellen 17

Schluß 19

R. UNIV. BIBLIOTHEEK LEIDEN

Einleitung.

Der Verlauf der Spannungen und Ströme in Wechselstromnetzen zeigt z. T. erhebliche Abweichungen von der Sinusform, die man bekanntlich als überlagerte Oberwellen auffassen kann. Über die in Drehstromanlagen auftretenden Oberwellen und ihre Auswirkungen geben bereits zahlreiche Veröffentlichungen Aufschluß[1]). In Zugförderungsnetzen, die mit Einphasen-Wechselstrom von $16^2/_3$ Hz betrieben werden, lassen sich derartige Abweichungen von der Sinusform ebenfalls feststellen. Diese können besonders bei einer Ausdehnung des elektrischen Zugbetriebes auf Strecken mit starkem Verkehr zu empfindlichen Störungen Anlaß geben. Es dürfte daher von Wert sein, ein vorhandenes Netz auf diese Erscheinungen hin zu untersuchen, um die Ergebnisse zur Verbesserung bestehender und zur zweckmäßigen Bemessung neuer Bahnanlagen verwerten zu können. In vorliegender Abhandlung sollen die im Netz der schlesischen Gebirgsbahnen auftretenden Oberwellen, ferner ihr störender Einfluß und einige Maßnahmen zu ihrer Beseitigung besprochen werden.

A. Aufbau und Auswertung der Versuche.

Die Oberwellenversuche im schlesischen Bahnnetz wurden vom Verfasser im Auftrage der Hauptverwaltung der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft in der Zeit vom 23. April bis 8. Mai 1930 und vom 16. bis 21. Mai 1931 durchgeführt. Für die Aufnahme von Oszillogrammen stand in beiden Fällen der Meßwagenzug[2]) des Reichsbahn-Zentralamtes zur Verfügung. Die Leitung der meßtechnischen Arbeiten hatte Herr Dipl.-Ing. Curtius.

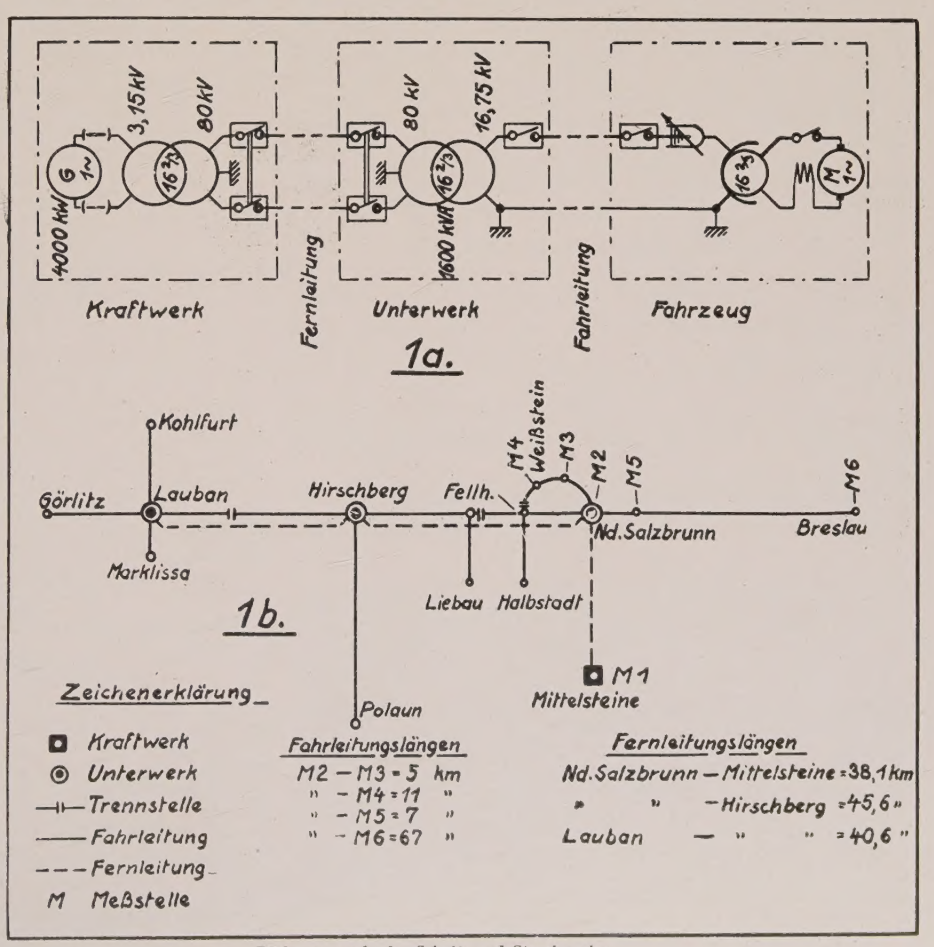
Ausführliche Angaben über das schlesische Bahnnetz finden sich in der Literatur[3]). Es sei hier nur erwähnt, daß die Zugförderungsenergie vom Reichsbahn-Kraftwerk Mittelsteine über eine 80 kV-Doppelleitung den drei Unterwerken Nieder Salzbrunn, Hirschberg und Lauban zugeführt und von diesen mit einer Nennspannung von 15 kV auf die einzelnen Fahrleitungsabschnitte verteilt wird. Um bei einer Reihe von Versuchen den normalen Betrieb nicht zu stören, wurde ein Versuchsnetz zusammengestellt, das aus einem 4000 kW-Generator, einer der beiden 80 kV-Leitungen von Mittelsteine bis Nieder Salzbrunn, einem besonderen Transformator im Unterwerk Nieder Salzbrunn und dem Fahrleitungsabschnitt Nieder Salzbrunn—Fellhammer bestand. Dieses Netz war vom übrigen Betriebe elektrisch getrennt und durch besondere Verdrillungen vor störenden Beeinflussungen geschützt. Die Strecke Nieder Salzbrunn—Fellhammer weist zwischen den Stationen Bad Salzbrunn und Weißstein starke Krümmungen und Steigungen bis zu $12{,}5^0/_{00}$ auf. In diesem Abschnitt, der sich zur Durchführung von Lastfahrten besonders eignet, wurden verschiedene Lokomotivgattungen untersucht, die folgende Betriebsnummern haben:

1 Do 1-Lok Nr. 1611, 17 104 und 17 119,
2 Do 1- ,, ,, 2151,
B+B+B- ,, ,, 9147,
C+C - ,, ,, 9057, 9190, 9195, 9199 und 91 104,
1 Co+Co 1- ,, ,, 9501.

Nähere Angaben über diese Lokomotiven finden sich in der Literatur[4]).

Die Schaltung des Versuchsnetzes ist in Bild 1 a schematisch dargestellt. Sie zeigt als Besonderheit im Hochspannungskreis des Lokomotivtransformators einen regelbaren Wasserwiderstand, dessen Verwendungszweck bei den Oberwellenmessungen später erläutert werden wird.

Untersuchungen des Betriebsnetzes fanden im Kraftwerk Mittelsteine und im Unterwerk Nieder Salzbrunn statt, ferner auf den Strecken Nieder Salzbrunn—Weißstein und Nieder Salzbrunn—Breslau (M 3 bis M 6 in Bild 1 b). In Lauban und Hirschberg waren bereits früher mit dem Meßwagen des Reichsbahn-Ausbesserungswerkes Lauban Oszillogramme der Netzspannungskurve aufgenommen worden, so daß Messungen an diesen Stellen jetzt unterbleiben konnten.



Bilder 1 a und 1 b. Schalt- und Streckenplan.

[1]) Vergl.: Biermanns, Die Spannungskurve großer Hochspannungsnetze. ETZ 1915, S. 609.
Friedländer, Die Verzerrung der Netzspannungskurve durch die Transformatoren, Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern Bd. 7, H. 2.
Geise und Plathner, Über den Einfluß der höheren Harmonischen des Drehstromnetzes auf die Oberwellenspannung von Gleichrichtern, ETZ 1931, S. 537.
Hueter, Über Oberwellen in Hochspannungsnetzen, Elektrizitätswirtschaft 1931, S. 185.
Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen, Untersuchung über den Einfluß der Eisensättigung der Transformatoren, Technische Mitteilung 1929 Nr. 32.

[2]) Vergl.: Curtius, Elektrische Meßwagen der Deutschen Reichsbahn, Elektrische Bahnen 1930, S. 164.

[3]) Vergl.: Heilbronn, Die Fernleitungen und Unterwerke der schlesischen Gebirgsbahnen, Der elektrische Zugbetrieb der Deutschen Reichsbahn (Wechmann), S. 90.
Küsel, Das Bahnkraftwerk Mittelsteine, Der elektrische Zugbetrieb der Deutschen Reichsbahn (Wechmann), S. 38. Usbeck, Das elektrische Reichsbahnnetz in Schlesien, Organ für die Fortschritte des Eisenbahnwesens 1928, S. 371.
Usbeck, Die Freiluftschaltanlage Nieder Salzbrunn der schlesischen Gebirgsbahnen, Elektrische Bahnen 1929, S. 129.
Wechmann, Mitteilungen aus dem elektrischen Fernzugbetrieb der Deutschen Reichsbahn, ETZ 1922, S. 805.

[4]) Vergl.: Kleinow, Reichsbahn-Schnellzuglokomotive mit Einzelachsenantrieb der Bauart Westinghouse-AEG, Elektrische Bahnen 1930, S. 129.
Kleinow, Gebirgsgüterzuglokomotive, Bauart C + C der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft, Elektrische Bahnen 1925, S. 311.
Kleinow und Tetzlaff, Die elektr. 1 Co + Co 1 — Güterzuglokomotive der Deutschen Reichsbahn, Elektrische Bahnen 1929, S. 4.
Loewentraut, 2 Do 1 Schnellzuglokomotive mit neuartigem Einzelachsenantrieb, Elektrische Bahnen 1926, S. 209.
Tetzlaff und Schlemmer, Neuere elektr. Lokomotiven der Deutschen Reichsbahn, VDI-Zeitschrift 1929, S. 667.
Wichert und Michel, Die 1 Do 1 Lokomotiven der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft, Elektrische Bahnen 1927, S. 71.
Winkler, Elektr. B + B + B Lokomotive für die Güterzugbeförderung auf den schlesischen Gebirgsbahnen.

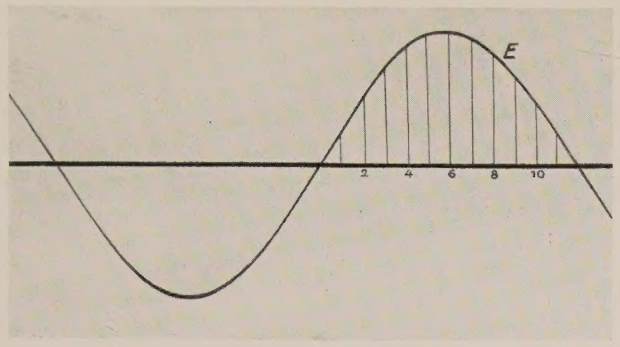


Bild 2. Spannungskurve des Generators im Leerlauf.

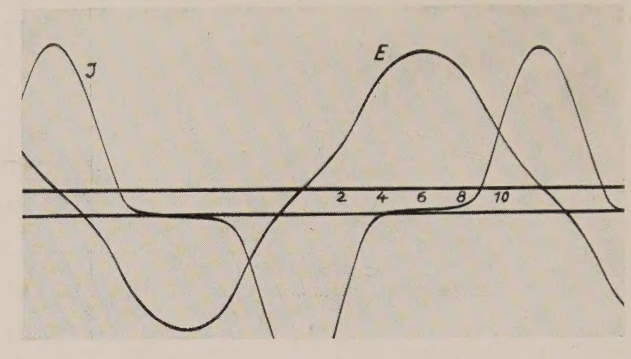


Bild 4. Strom- und Spannungsverlauf an einem unbelasteten Lokomotivtransformator.

Das Ergebnis der gesamten Versuche waren etwa 900 Oszillogramme von Strom- und Spannungskurven, die auf rechnerischem Wege ausgewertet wurden[5]). Bild 2 zeigt eine fast sinusförmige Spannungskurve mit den zur Auswertung eingezeichneten Ordinaten.

Da die aufgenommenen Kurven infolge des Fehlens gerader Harmonischer sämtlich spiegelbildlich gleich sind, genügt die Auswertung einer Halbwelle. Um möglichst genaue Werte zu erzielen, wurde die Teilung 12 gewählt. Durch die rechnerische Analyse[6]), deren weiterer Gang als bekannt vorausgesetzt wird, wurden aber nur die Oberwellen niedriger Frequenz ermittelt, und zwar genügte im allgemeinen eine Nachrechnung bis zur 9. Harmonischen.

Die Oberwellen höherer Wechselzahl, wie sie beispielsweise die Spannungskurve in Bild 3 enthält, konnten einfacher bestimmt werden. Ihre Amplituden lassen sich mit genügender Sicherheit durch direkte Messung aus dem Oszillogramm zahlenmäßig feststellen.

Die für die Oberwellen gefundenen Werte können natürlich keinen Anspruch darauf erheben, absolut genau zu sein, denn sowohl dem Oszillogramm als auch dem Auswertungsverfahren haften Fehler[7]) an. Für den vorliegenden Zweck dürfte aber die erzielte Meßgenauigkeit ausreichend sein, da es hier hauptsächlich darauf ankommt, die Beziehungen zwischen den Amplitudenwerten der Oberwellen und anderen elektrischen Größen kurvenmäßig darzustellen. Daß die Abweichungen der errechneten Oberwellenwerte von den Sollwerten nicht allzu groß sein können, beweist einmal das geringe Streuen der Meßpunkte in den folgenden Kurven und ferner die Tatsache, daß Messungen, die verschiedentlich unter gleichen Bedingungen wiederholt wurden, stets annähernd dieselben Werte ergaben. Größere Ungenauigkeiten sind nur bei Oberwellenanteilen zu beobachten, die unter 1,5 vH der Grundwellenamplitude betragen, aber diese Werte haben geringere praktische Bedeutung.

B. Die Oberwellen niedriger Frequenz.

1. Ursachen der Oberwellen.

Die Gruppe der Oberwellen niedriger Frequenz beginnt mit der 3. Harmonischen und soll hier bis zur 9. Harmonischen (150 Hz) untersucht werden. Die 11. Oberwelle zeigt bereits in allen Fällen so kleine Amplitudenwerte, daß sie bei vorliegender Untersuchung vernachlässigt werden kann.

Niederfrequente Oberwellen sind häufig in der Spannungskurve der Generatoren zu finden, besonders wenn es sich um ältere Maschinen mit ausgeprägten Polen handelt. Die Kurvenform der Ströme weist dann ebenfalls Verzerrungen auf. Bei modernen Generatoren erreichen aber diese Oberwellen meist so geringe Amplitudenwerte, daß sie praktisch bedeutungslos sind. Weit größer ist der Einfluß zu hoher Eisensättigung. Führt man einem unbelasteten Transformator, der im geradlinigen Bereich der Magnetisierungskurve arbeitet, eine sinusförmige Spannung zu, so hat der Magnetisierungsstrom ebenfalls Sinusform, da die magnetische Eisendurchlässigkeit konstant bleibt. Ist aber das Eisen hoch gesättigt, dann wird die Durchlässigkeit mit wachsendem Zeitwert des Stromes kleiner, was aus dem Abweichen der Magnetisierungskurve vom geradlinigen Verlauf hervorgeht. Bei sinusförmiger EMK, also auch sinusförmigem Induktionsverlauf, müssen daher die Zeitwerte des Magnetisierungsstromes mit beginnender Eisensättigung stärker als proportional mit den Zeitwerten der Spannung steigen. Die Stromkurve, deren Form sich also aus der Magnetisierungscharakteristik ergibt[8]), wird spitz und erhält neben anderen Oberwellen eine stark ausgeprägte 3. Harmonische. Bild 4 zeigt das Oszillogramm eines solchen Magnetisierungsstromes. Die dem Transformator zugeführte Spannung war hier allerdings nicht sinusförmig. Bei sinusförmiger Spannungskurve würde sich jedoch die charakteristische, spitze Form der Stromkurve nur wenig ändern.

Fließt bei sinusförmiger Generator-EMK ein nicht sinusförmiger Strom in einem Kreis mit Ohmschem und induktivem Widerstand, so werden vom Grundwellenstrom, aber auch von den Oberwellenströmen an den genannten Widerständen Spannungsabfälle erzeugt. Hierbei ist zu beachten, daß der induktive Widerstand mit der Frequenz der Oberwellen wächst. Die Zeitwerte der sinusförmigen EMK vermindern sich um die zugehörigen Zeitwerte der einzelnen Spannungsabfälle, und man erhält eine Netzspannung, deren Verlauf von der Sinusform abweicht[9]), vergl. die Spannungskurve in Bild 4. Die Eisensättigung von Transformatoren verursacht also trotz sinusförmiger Generatorspannung Oberwellen im Strom und diese wirken wieder auf die Netzspannungskurve ein. Ähnlich ist der Einfluß stark gesättigter Motoren. Genauere Erklärungen werden an Hand von Diagrammen am Schluß der Abhandlung folgen.

2. Einfluß der einzelnen Netzglieder auf die Form der Strom- und Spannungskurven.

Die Eiseninduktion eines Transformators normaler Streuung ist bekanntlich der angelegten Spannung annähernd proportional, solange der Ohmsche Spannungsverlust vernachlässigt werden kann. Das ist im allgemeinen bei Leerlauf der Fall. Die

[5]) Zur Auswertung wurden die „Rechentafeln zur harmonischen Analyse" von L. W. Pollak, Verlag Joh. Ambrosius Barth, Leipzig, benutzt.

[6]) Vergl. auch Kittler, Allgemeine Elektrotechnik, Bd. II, 1. Aufl., S. 291.

[7]) Vergl.: Hueter, Ein unmittelbar anzeigendes Oberwellenmeßgerät, ETZ 1931, S. 472*.

[8]) Vergl.: Friedländer, Die Verzerrung der Netzspannungskurve durch die Transformatoren, Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern 1929, Bd. 7, Heft 2, S. 3, Bild 3.

[9]) Vergl.: Hueter, Über Oberwellen in Hochspannungsnetzen, Elektrizitätswirtschaft 1931, S. 188.

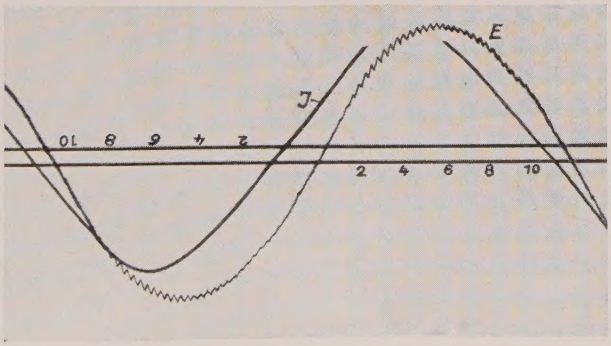


Bild 3. Strom- und Spannungsverlauf bei einer Lokomotiv-Lastfahrt.

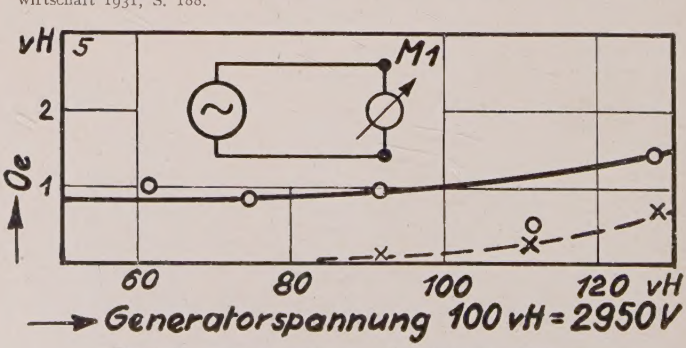


Bild 5 Spannungsoberwellen am unbelasteten Generator.

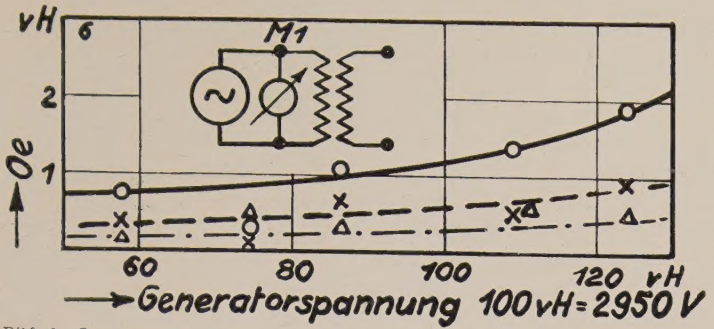


Bild 6. Spannungsoberwellen am unbelasteten Kraftwerks-Transformator, Primärseite.

Beziehungen zwischen Spannung bzw. Eisensättigung und Kurvenform lassen sich daher in einfacher Weise und mit ausreichender Genauigkeit ermitteln, wenn man dem leerlaufenden Transformator Spannungen verschiedener Höhe der Reihe nach zuführt und die hierbei gemessenen Abweichungen von der Sinusform in Abhängigkeit von der Spannung aufträgt. Die Größe der Abweichungen ist durch das Verhältnis von Oberwellenamplitude zu Grundwellenamplitude bestimmt. Um die Einflüsse der einzelnen Glieder des eingangs beschriebenen Versuchsnetzes auf die Form der Spannungskurve untereinander vergleichen zu können, wurde die Spannung in Hundertteile umgerechnet, und zwar entsprechen 100 vH

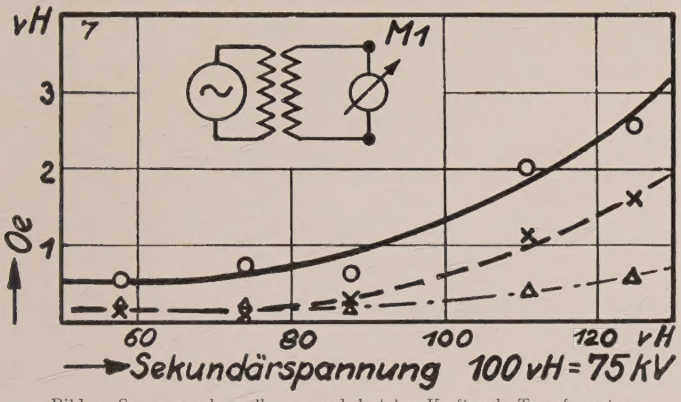


Bild 7. Spannungsoberwellen am unbelasteten Kraftwerks-Transformator, Sekundärseite.

einer Generatorspannung von 2950 V und einer Fahrdrahtspannung von 15 kV. In beiden Fällen handelt es sich um Effektivwerte.

Bild 5 gilt für den vollkommen unbelasteten Versuchs-Generator im Kraftwerk Mittelsteine, der eine Leistung von 4000 kW und eine Drehzahl von 1000 U/min hat. Seine Spannungskurve zeigt selbst bei hoher Erregung nur ganz geringe Verzerrungen[10]). Ob die gleichen günstigen Verhältnisse vorliegen, wenn der Generator bei Vollast auf eine rein Ohmsche Belastung arbeitet, ist noch nicht untersucht worden. Vermutlich wird aber keine wesentliche Verschlechterung gegenüber dem Leerlauf ein-

[10]) Zeichenerklärung für die Abbildungen:
—○—○— 3. Oberwelle — - △ - - △ - — 7. Oberwelle
— —×— —×— — 5. „ - - - - + - - - - + - - - 9. „
Oe = Oberwellenspannung in vH der Grundwellenspannung.

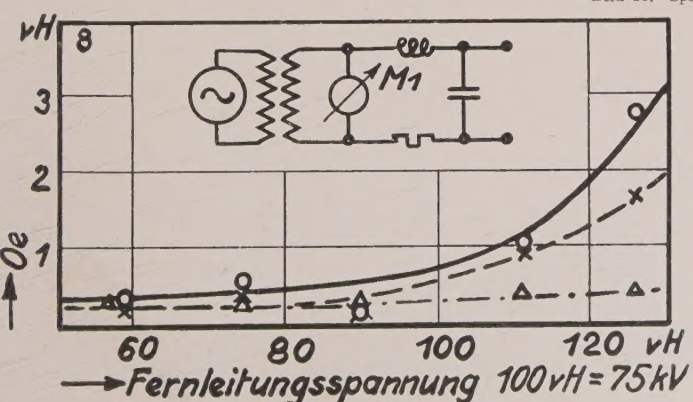


Bild 8. Spannungsoberwellen am Fernleitungsanfang.

treten, da Turbogeneratoren im allgemeinen auch bei Belastung eine gute Spannungskurve liefern.

Läßt man den Generator auf den zunächst noch sekundär offenen Kraftwerkstransformator arbeiten, so wachsen mit zunehmender Spannung die Verzerrungen des Magnetisierungsstromes. Aus den in Abschnitt B 1 angeführten Gründen müssen daher auf der Primärseite des Transformators die Oberwellenspannungen steigen, was Bild 6 bestätigt.

Die Oberwellenwerte, welche auf der Sekundärseite des Transformators ermittelt wurden, Bild 7, stimmen mit denen auf der Primärseite nicht überein. Ähnliche Feststellungen wurden in Drehstromnetzen gemacht[11]). Die höheren Oberwellenspannungen auf der Sekundärseite sind eine Folge der Ohmschen und der Streuspannungen am

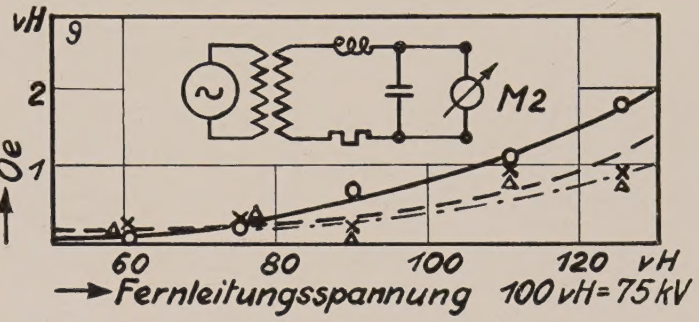


Bild 9. Spannungsoberwellen am offenen Fernleitungsende.

Transformator, welche primärseitig von den Oberwellenströmen erzeugt werden. Nähere Erklärungen werden am Schluß der Abhandlung folgen.

Die Bilder 8 und 9 zeigen die Spannungsverhältnisse bei eingeschalteter, aber im Unterwerk Nieder Salzbrunn noch geöffneter 80 kV-Leitung. Während die Leitungen ausgedehnter Hochspannungsnetze in der Regel die Form der Spannungskurve beeinflussen, ist das hier nicht der Fall. Denn die nur 38,1 km lange Fernleitung Mittelsteine—Nieder Salzbrunn hat im Bereich der niedrigen Frequenzen so hohe kapazitive Widerstände, daß sich keine nennenswerten Oberwellen-Verschiebeströme ausbilden können. Damit entfällt auch der Grund für eine weitere Verschlechterung der Spannungskurve.

Der zugeschaltete Unterwerks-Transformator, Bild 10 und 11, nimmt einen verzerrten Magnetisierungsstrom auf

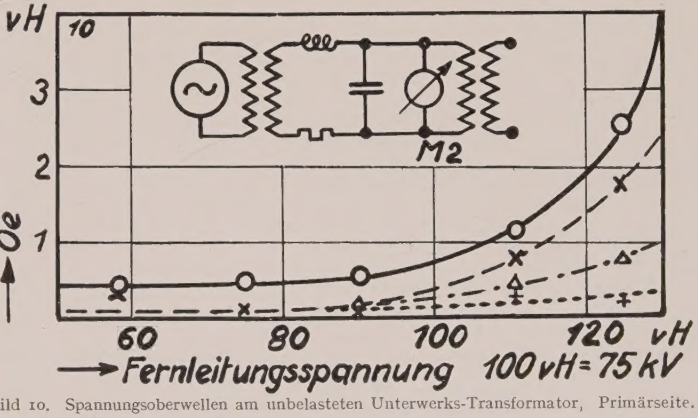


Bild 10. Spannungsoberwellen am unbelasteten Unterwerks-Transformator, Primärseite.

und vergrößert dadurch die Oberwellenströme im Versuchsnetz. Daher steigen auch die Oberwellenspannungen, und zwar auf der Sekundärseite wieder stärker als auf der Primärseite (vergl. die Ausführungen zu Bild 7).

Wie Bild 12 zeigt, verursacht die 11 km lange Fahrleitung von Nieder Salzbrunn bis Weißstein kein weiteres Steigen der Oberwellenspannungen. Die Verhältnisse liegen hier ähnlich wie bei der 80 kV-Fernleitung. Vergleicht man die Bilder 5 und 12, so ist zwar eine Zunahme der prozentualen Amplitudenwerte der Oberwellen festzustellen, aber unter Berücksichtigung der doppelten Transformierung ist sie als gering anzusprechen. So steigt z. B. die 3. Harmonische bei 110 vH der Nennspannung nur von 1,2 auf etwa 2,2 vH der Grundwellenamplitude.

[11]) Vergl.: Untersuchung über den Einfluß der Eisensättigung der Transformatoren, Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen, Technische Mitteilung 1929, Nr. 32.

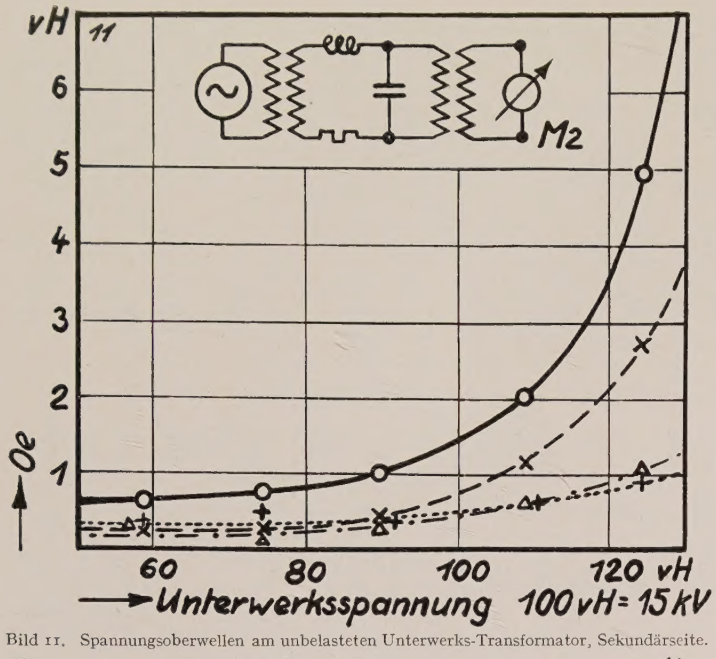


Bild 11. Spannungsoberwellen am unbelasteten Unterwerks-Transformator, Sekundärseite.

Einen außerordentlich starken Einfluß auf die Form der Spannungskurve haben die Lokomotiv-Transformatoren, da ihre Eisensättigung mit Rücksicht auf eine Gewichtsersparnis im allgemeinen sehr hoch gewählt ist. Die Bilder 13 und 14 zeigen die Ergebnisse von Messungen, die an dem leerlaufenden Transformator einer C+C Lokomotive vorgenommen wurden. Der Standort der Maschine war Weißstein. Die auf den beiden Transformatorseiten ermittelten Oberwellenspannungen zeigen keine großen Unterschiede. Im Gegensatz zu den bisher besprochenen Transformatoren ist dieser in Sparschaltung ausgeführt. Zu bemerken wäre noch, daß die Fahrdrahtspannung im schlesischen Netz mit Rücksicht auf den Spannungsabfall bei schweren Anfahrten in der Regel 16 kV beträgt und Werte bis über 16,5 kV, das sind 110 vH der Nennspannung, erreicht. In diesem Bereich ist die Zunahme der Oberwellenamplituden bereits ganz beträchtlich.

Noch ungünstiger liegen die Verhältnisse bei den Transformatoren der B+B+B Lokomotive, Bild 15. Wie stark das Eisen hier bei Fahrdrahtspannungen von 15 bis 16,5 kV ausgenutzt ist, veranschaulicht die Magnetisierungscharakteristik, Bild 16, die für einen der beiden parallel arbeitenden Transformatoren gilt. Allerdings handelt es sich hier um eine ältere, etwas ungewöhnliche Transformatorbauart. Die übrigen, eingangs aufgeführten Lokomotivgattungen, die unter den gleichen Verhältnissen untersucht wurden, weisen nicht ganz so hohe Eisensättigungen auf. Auf der Hochvoltseite ihrer Transformatoren waren Oberwellenspannungen festzustellen, die zwischen den in den Bildern 13 und 15 dargestellten Werten liegen.

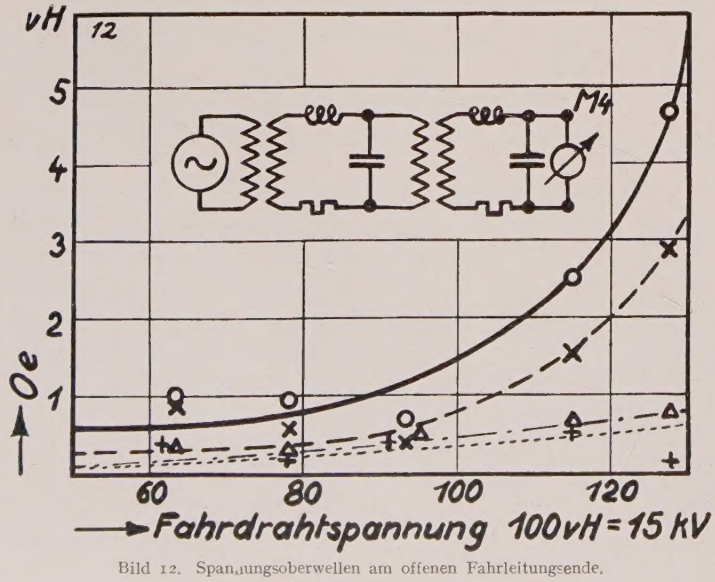


Bild 12. Spannungsoberwellen am offenen Fahrleitungsende.

Für die Beurteilung mancher Fragen ist es wertvoll, den Anteil zu kennen, den ein Lokomotivtransformator an der gesamten Verzerrung der Netzspannungskurve hat. Dieser ergibt sich beispielsweise für die C+C Lokomotive als Differenz aus den Werten der Bilder 12 und 13. Nach Bild 17 nimmt demnach die Spannung der 3. Harmonischen bei einer Fahrdrahtspannung von 16,5 kV um etwa 1,8 vH des Grundwellenwertes zu, wenn das Netz den Transformator einer einzigen C+C Lokomotive speist. Sind mehrere Fahrzeuge mit leerlaufenden Transformatoren auf dem Streckenabschnitt, so ist die Zunahme der Oberwellenspannung entsprechend größer. Diese Tatsache hat für Strecken mit dichter Zugfolge besondere Bedeutung.

Bild 18 zeigt, wie die Spannungswerte der 3. Harmonischen steigen, wenn das Versuchsnetz der Reihe nach mit leerlaufenden Lokomotivtransformatoren belastet wird. Die 1. Maschine gehörte der Gattung 1 Do 1 (E 17 104) an, die weiteren waren C+C Lokomotiven. Die effektive Fahrdrahtspannung betrug zu Beginn des Versuches 16,5 kV und sank mit wachsender Belastung bis auf etwa 15 kV. Bei gleichbleibender Spannung wäre vermutlich der Kurvenverlauf in Bild 18 annähernd geradlinig ausgefallen.

Wichtiger noch als die Verhältnisse bei Leerlauf sind die Rückwirkungen des belasteten Transformators auf die Spannungskurve, denn die Mehrzahl der Lokomotiven hat betriebsmäßig Zugleistungen zu bewältigen. Da die Zusammenhänge infolge des Einflusses der Motoren

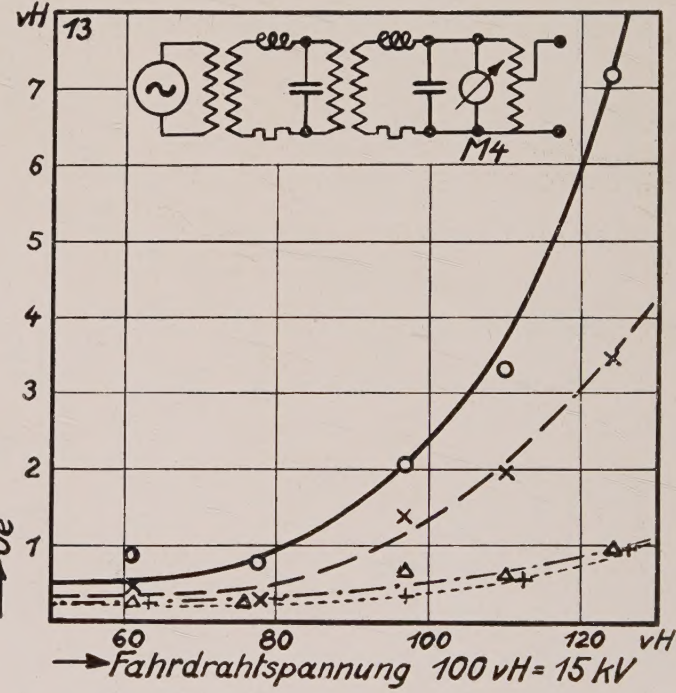


Bild 13. Spannungsoberwellen am leerlaufenden Transformator der C + C Lok. E 91 104, Primärseite.

hier nicht mehr so leicht zu übersehen sind wie beim leerlaufenden Transformator, sei zuerst die Kurvenform der Belastungsströme untersucht. Gemessen wurde wieder auf der 15 kV-Seite der Transformatoren. Die folgenden Werte sind in Abhängigkeit von der Leistung aufgetragen, und zwar entsprechen 100 vH = 1950 kVA, d. i. die Transformator-Dauerleistung der C+C Lokomotiven.

Der Transformator der C+C Lokomotive hat eine Magnetisierungscharakteristik, welche im Vergleich mit denen der übrigen untersuchten Maschinen noch als günstig zu bezeichnen ist. Trotzdem können hier die Oberwellenströme bei hoher Fahrdrahtspannung und kleiner Transformatorbelastung im Verhältnis zum Grundwellenstrom ganz beträchtliche Werte erreichen, wie Bild 19 zeigt[12]).

Mit zunehmender Leistung gehen die Stromverzerrungen zurück, entsprechend der prozentualen Abnahme des Magnetisierungsstromes. Die höchsten Werte hat wieder die 3. Harmonische zu verzeichnen, bemerkenswert ist ferner, daß hier die Amplituden der 5. Oberwelle

[12]) Zeichenerklärung für die weiteren Abbildungen: Oi = Oberwellenstrom in vH des Grundwellenstromes.

von denen der 9. Harmonischen bei kleinen Leistungen weit übertroffen werden.

Wird die Spannung im Versuchsnetz auf den annähernd betriebsmäßigen Wert von 16,5 kV herabgesetzt, so ist bei kleinen Transformatorleistungen gegenüber Bild 19 bereits ein erhebliches Abnehmen der Stromverzerrungen festzustellen, Bild 20. Auch hier erreichen die Ströme der 9. Oberwelle die zweithöchsten Werte.

Bei weiterem Senken der Spannung nähert sich der Verlauf des Transformatorstromes, wenigstens bei kleinen Leistungen, immer mehr der Sinusform, Bilder 21 und 22.

Es ist bereits darauf hingewiesen worden, daß die leerlaufenden Transformatoren der B + B + B Lokomotiven besonders hohe Verzerrungen hervorrufen. Ähnliche Feststellungen kann man bei Belastung machen, Bild 23, wie ein Vergleich mit den Versuchsergebnissen der Lastfahrt einer C + C Lokomotive, Bild 20, zeigt. Der Gegenüberstellung wegen ist in Bild 23 der Maßstab für die Leistung beibehalten worden.

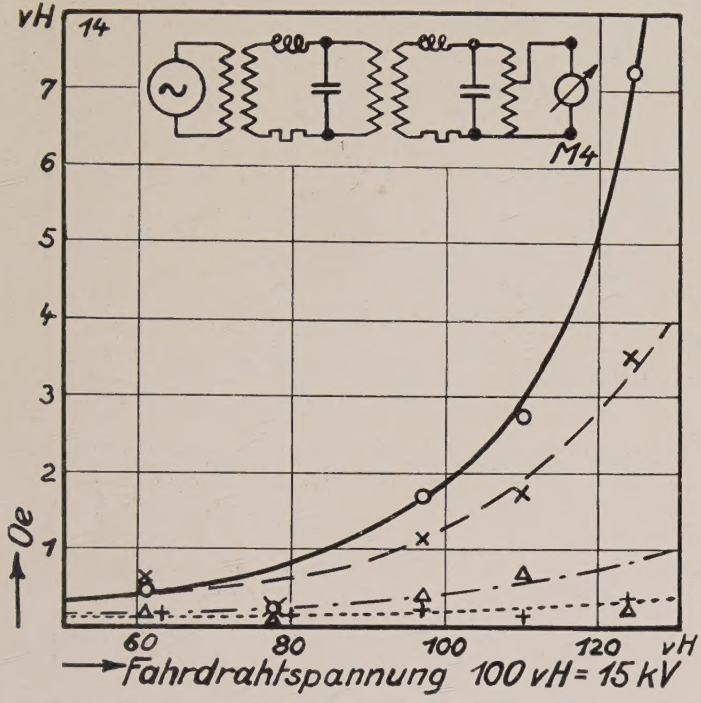


Bild 14. Spannungsoberwellen am leerlaufenden Transformator der C + C Lok. 91 104, Sekundärseite.

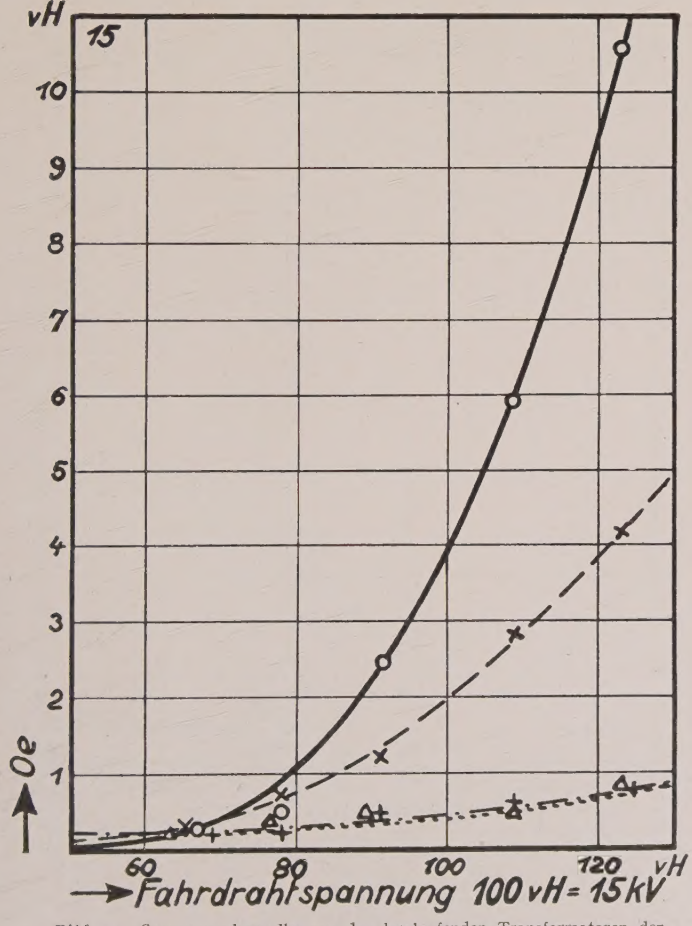


Bild 15. Spannungsoberwellen an den leerlaufenden Transformatoren der B + B + B Lok., Primärseite. Meßstelle M 4.

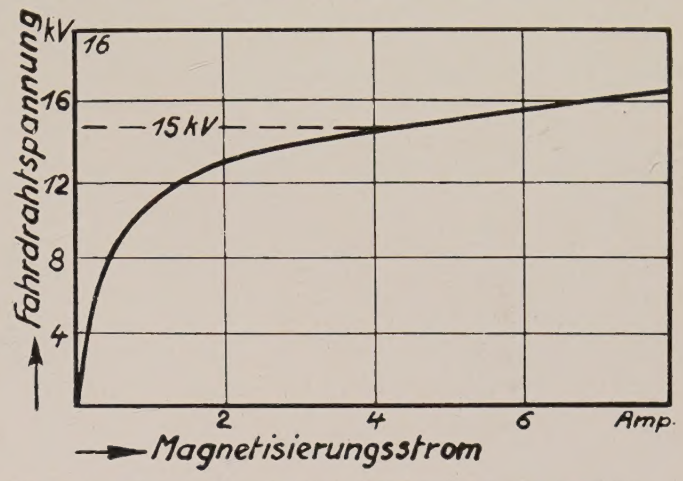


Bild 16. Magnetisierungs-Charakteristik des Transformators der B + B + B Lok.

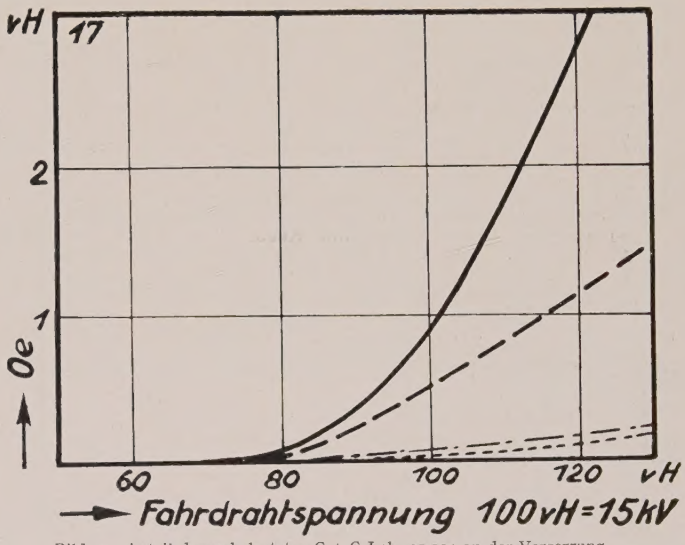


Bild 17. Anteil der unbelasteten C + C Lok. 91 104 an der Verzerrung der Spannungskurve. Meßstelle M 4.

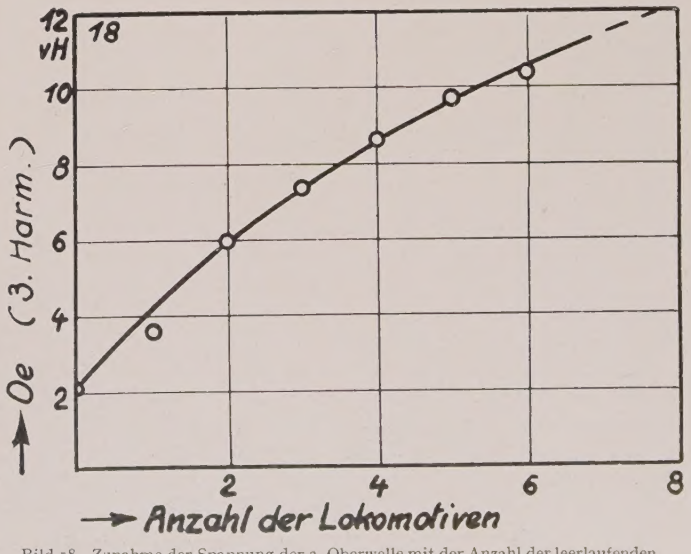


Bild 18. Zunahme der Spannung der 3. Oberwelle mit der Anzahl der leerlaufenden Lokomotiv-Transformatoren. Meßstelle M 3.

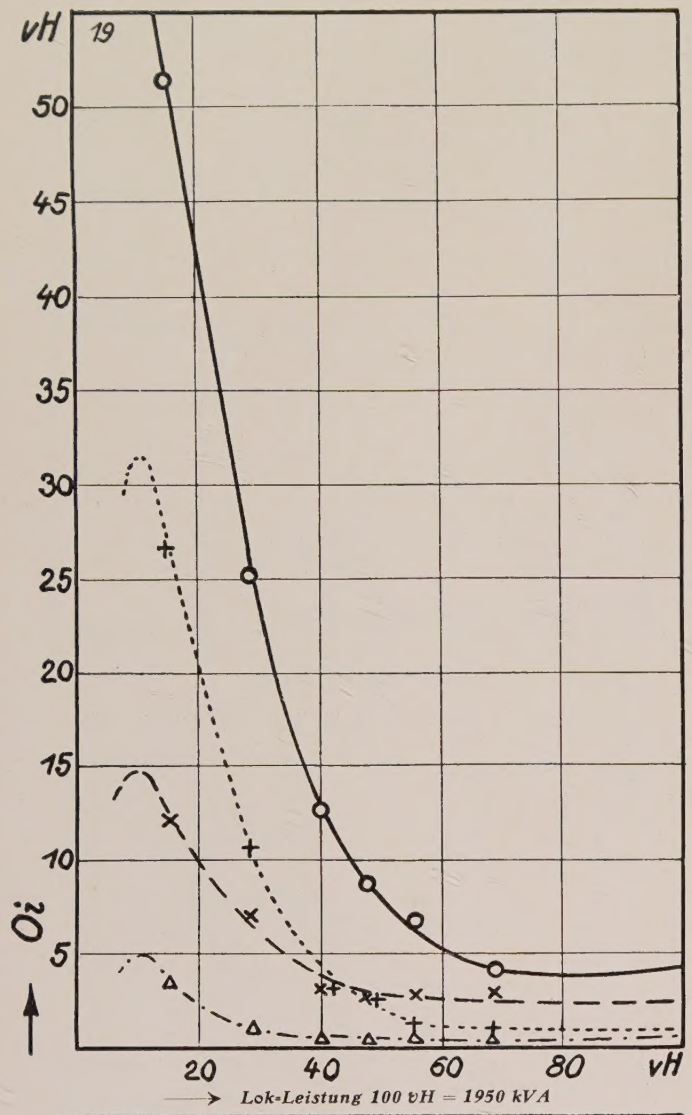


Bild 19 (links). Stromoberwellen bei Lastfahrt der C + C Lok 91 104, Fahrdrahtspannung = 120 vH, Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

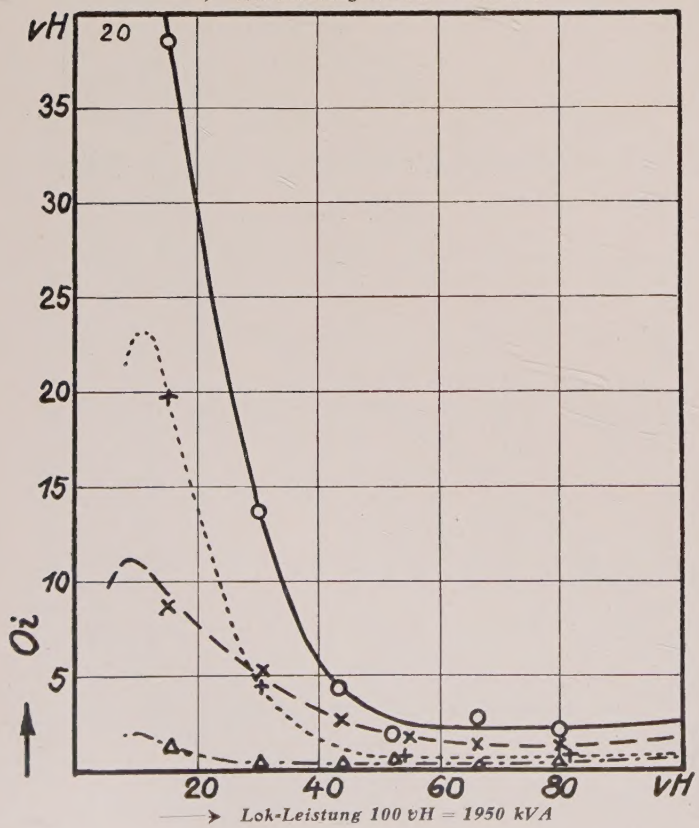


Bild 20 (links). Stromoberwellen bei Lastfahrt der C + C Lok 91 104, Fahrdrahtspannung = 110 vH, Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

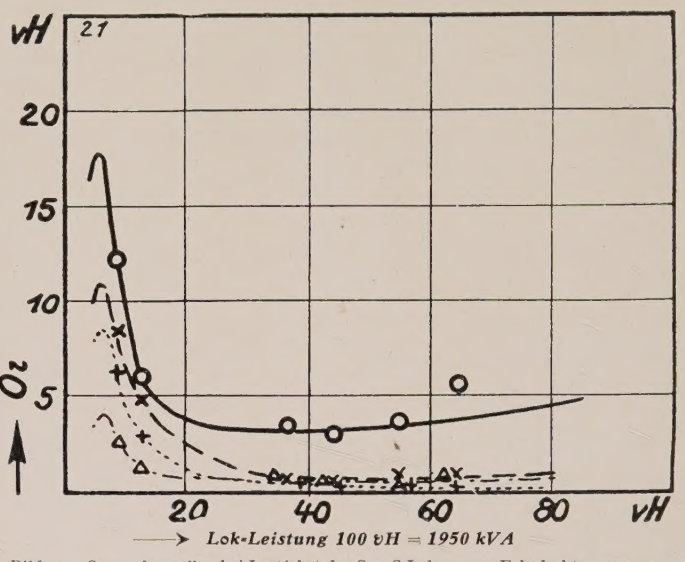


Bild 21. Stromoberwellen bei Lastfahrt der C + C Lok 91 104, Fahrdrahtspannung = 90 vH, Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

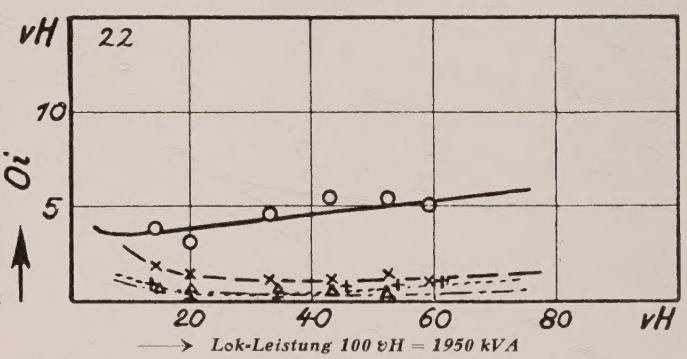


Bild 22. Stromoberwellen bei Lastfahrt der C + C Lok 91 104, Fahrdrahtspannung = 71 vH, Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

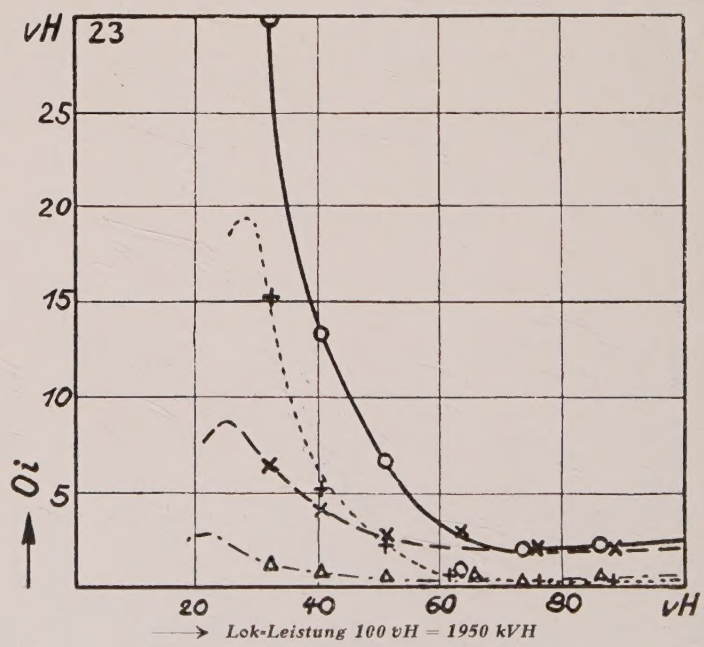


Bild 23. Stromoberwellen bei Lastfahrt der B + B + B Lok, Fahrdrahtspannung = 105 vH, Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

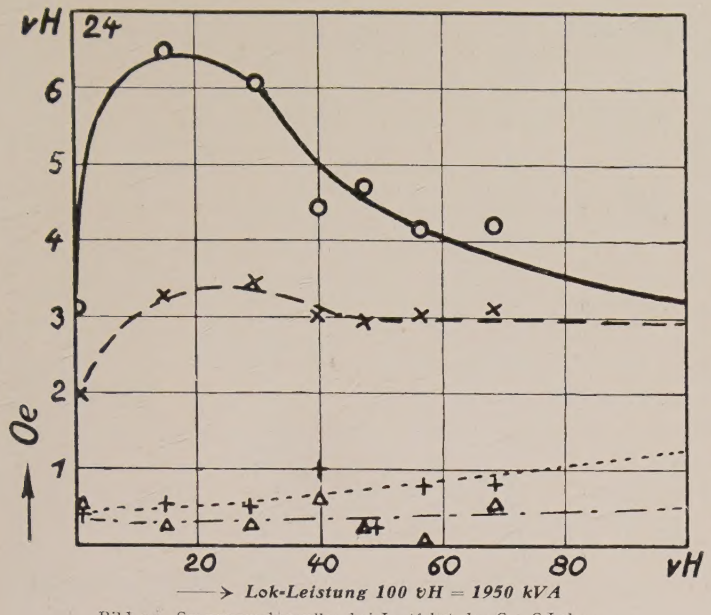


Bild 24. Spannungsoberwellen bei Lastfahrt der C + C Lok 91 104 Fahrdrahtspannung = 120 vH, Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

Die Lastfahrten mit den übrigen Lokomotivgattungen ergaben für die im Strom auftretenden Oberwellenamplituden Werte, die zwischen den bei der C + C und der B + B + B Lokomotive gefundenen Größen liegen.

Die Abnahme der Stromverzerrungen bei Belastung wirkt natürlich auf die Kurvenform der Fahrdrahtspannung zurück. Wie Bild 24 zeigt, ist dieser Einfluß bei einer mit hoher Netzspannung durchgeführten Fahrt der C + C Lokomotive deutlich zu erkennen. Die Spannung der 3. Oberwelle weist die stärksten Änderungen auf, während die der 5. Harmonischen von der Belastung weniger abhängig ist. Im Gegensatz zu den im Stromverlauf beobachteten Abweichungen von der Sinusform, Bild 19, erreicht die 9. Oberwelle hier nur geringe Amplitudenwerte. Es fällt ferner auf, daß die Meßpunkte stark streuen. Der Grund hierfür ist, daß es bei einer Lokomotivmeßfahrt technisch und betrieblich nicht immer möglich ist, Änderungen der konstant zu haltenden Faktoren, beispielsweise der Fahrdrahtspannung, auszuschalten. Gemessen wurde wie bisher auf der 15 kV-Seite der Lokomotivtransformatoren.

Bild 25 läßt erkennen, daß die Verhältniswerte der dritten Spannungsoberwelle bei betriebsmäßiger Höhe der Fahrdrahtspannung mit steigender Belastung zunächst abnehmen, jedoch von etwa der Halblast ab wieder wachsen. Die Meßpunkte der 3. Harmonischen streuen hier zwar stark, die gezeichnete Kurvenform entspricht aber den Verhältnissen, wie sie auch an anderen Fahrzeugen unter ähnlichen Bedingungen festgestellt wurden. Spätere Bilder werden

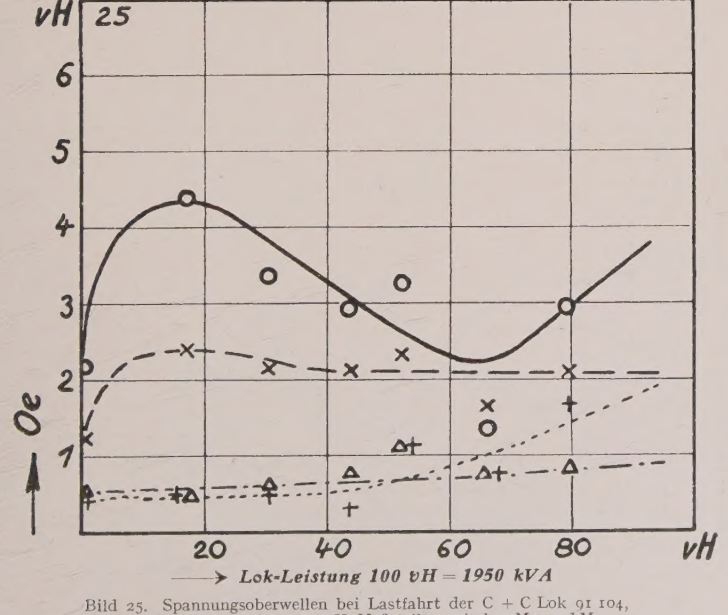


Bild 25. Spannungsoberwellen bei Lastfahrt der C + C Lok 91 104, Fahrdrahtspannung = 110 vH, Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

die erwähnte Eigenart deutlicher zeigen. Nimmt man die Lastfahrten bei noch tieferer Netzspannung vor, so wird der Einfluß der Transformator-Eisensättigung verschwindend gering, Bilder 26 und 27, dafür ist die Zunahme des Verhältniswertes der 3. Oberwelle mit steigender Leistung um so ausgeprägter. Diese Rückwirkung auf die Spannungskurve geht von den Lokomotivmotoren aus.

Lokomotiv-Motoren nehmen ähnlich wie die Transformatoren bei hoher Eisensättigung Ströme auf, die von der Sinusform abweichen[13]). Hierzu kommen die Verzerrungen des Motorstromverlaufes infolge einer nicht sinusförmigen Netzspannung. Die im Motorstrom auftretenden Oberwellen müssen auch die Kurvenform des Fahrdrahtstromes verändern, wenn die Rückwirkung der Motoren groß genug ist. Dies sei an Hand der Bilder 19 bis 22 nachgeprüft.

Wäre der Lokomotivtransformator an der Stromverzerrung allein beteiligt, so müßte der Anteil des Oberwellenstromes am Grundwellenstrom mit steigender Leistung ständig abnehmen, da das Verhältnis von Magnetisierungsstrom zum Gesamtstrom fällt. Die Messungen zeigen jedoch, daß der Oberwellenanteil bei höheren Leistungen z. T. sogar ansteigt, im günstigsten Falle aber konstant bleibt. Dieser Kurvenverlauf kommt dadurch zustande, daß sich zu den Oberwellen des Transformator-Magnetisierungsstromes bei hoher Motorbelastung noch weitere geometrisch addieren, die im Motorstrom infolge der Motoreisensättigung enthalten sind. Bei einer Versuchsfahrt mit der 1 Do 1 Lokomotive E 17119, Bild 28, war das Steigen des prozentualen Anteiles der 3. Oberwelle im Fahrdrahtstrom mit wachsender Lokomotivleistung besonders deutlich zu sehen.

Bei der bisherigen Betrachtung sind noch Oberwellenströme unberücksichtigt geblieben, die im Motorkreis als Folge des

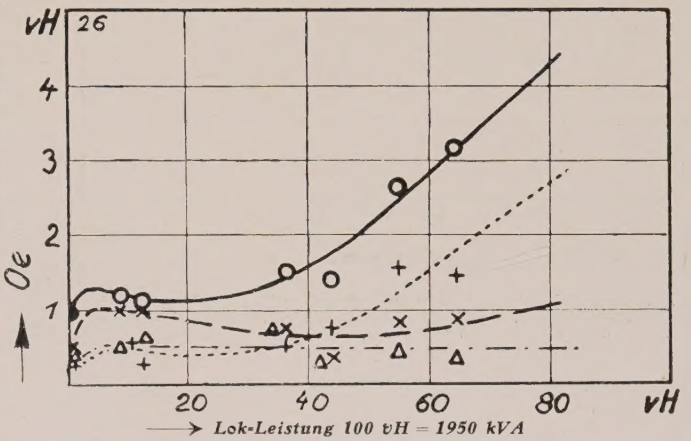


Bild 26. Spannungsoberwellen bei Lastfahrt der C + C Lok 91 104, Fahrdrahtspannung = 90 vH, Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

verzerrten Verlaufes der Sekundärspannung am Transformator fließen. Größe und Phasenlage derselben sind von der Drehzahl abhängig, und zwar verschlechtern beispielsweise derartige Ströme der 3. Harmonischen die Motorstromkurve bei hoher und verbessern sie bei niedriger Drehzahl. So kommt es, daß die Abweichungen von der Sinusform trotz sinkender Stromstärke und Motoreisensättigung mit wachsender Drehzahl zunehmen, und dies um so mehr, je höher die Verzerrungen im Kurvenverlauf der dem Motor zugeführten Spannung sind. Ein näheres Eingehen auf die Beziehungen zwischen den Phasenlagen der Oberwellenströme und den Drehzahlen der untersuchten Motoren würde zu weit führen und muß daher einer späteren Untersuchung vorbehalten bleiben.

Bild 29 zeigt, wie sich unter dem Einfluß einer stark verzerrten Netzspannungskurve der Anteil der 3. Oberwelle im Motorstrom bei gleichbleibender Auslastung des Transformators mit wachsender Motorspannung, also auch steigender Drehzahl, ändern kann. Mit zunehmender Stromstärke und Leistung, aber konstanter Spannung, Bild 30, werden die Stromverzerrungen geringer. Da jedoch zur Steigerung der Lokomotivleistung im allgemeinen die Motorspannung durch Zuschalten von Transformatorstufen erhöht wird, während der Motorstrom sinkt, nimmt der Verhältniswert der 3. Harmonischen bei wachsender Leistung betriebsmäßig zu, und zwar auch im Fahrdrahtstrom. Voraussetzung ist hierbei, daß die Spannungskurve des Netzes stark von der Sinusform abweicht, wie es bei diesem Versuch tatsächlich der Fall war.

[13]) Vergl.: Töfflinger, Der Einphasen-Bahnmotor, Verlag Oldenbourg, S. 13.

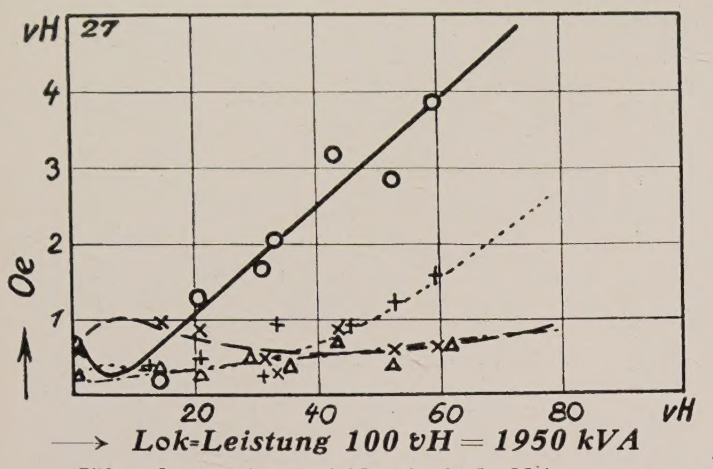


Bild 27. Spannungsoberwellen bei Lastfahrt der C + C Lok 91 104, Fahrdrahtspannung = 71 v H, Meßstellen zwischen M3 und M 4.

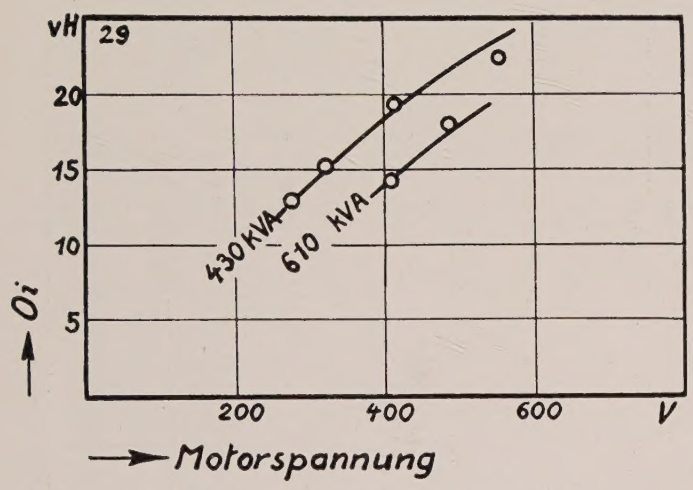


Bild 29. 3. Oberwelle im Strom eines Doppelmotors der 1 Do 1 Lok E 17 104 bei konstanten Motorleistungen. Fahrdrahtspannung = 102 vH, Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

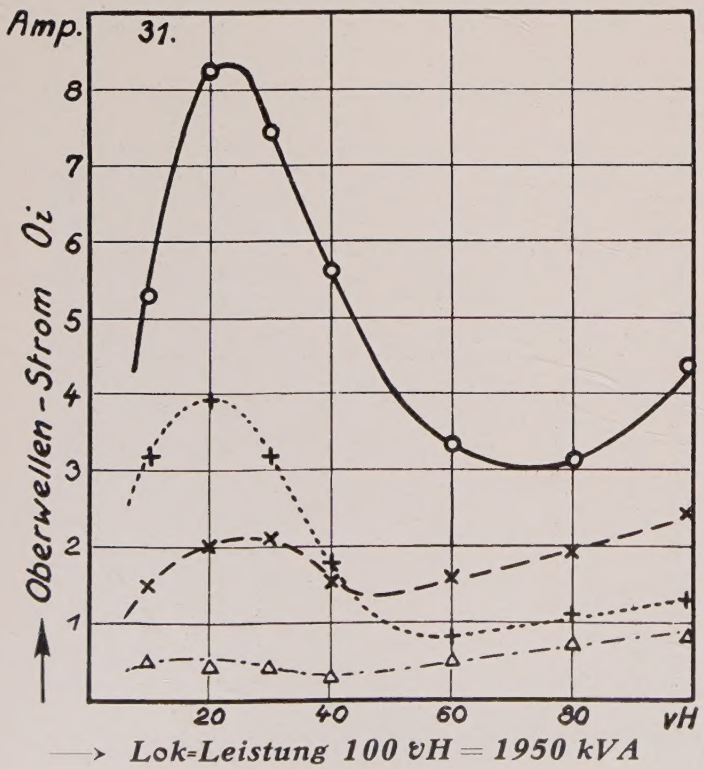


Bild 31. Oberwellenströme bei Lastfahrt der C + C Lok 91 104, Fahrdrahtspannung = 120 vH, Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

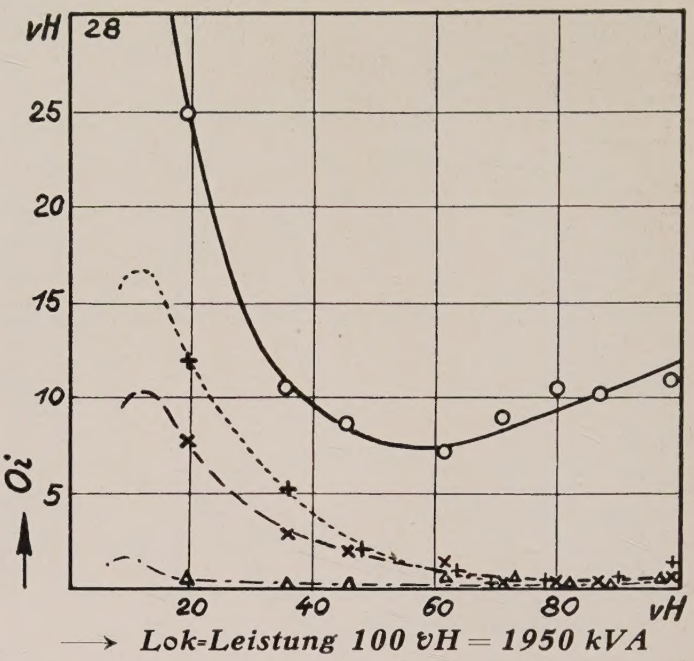


Bild 28. Stromoberwellen bei Lastfahrt der 1 Do 1 Lok 17 119, Fahrdrahtspannung = 109 vH, Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

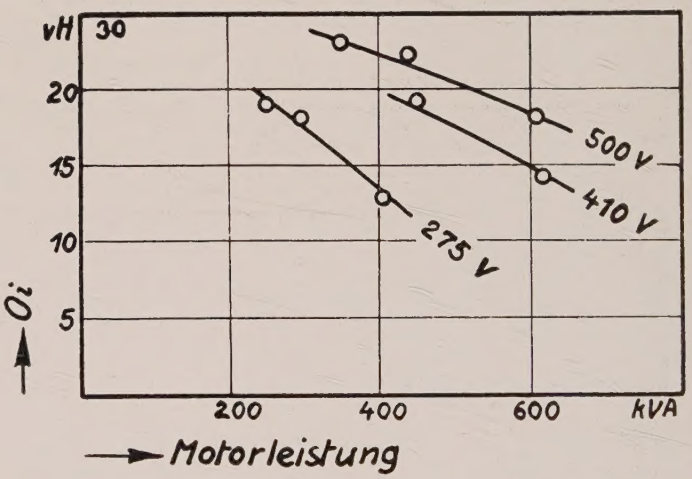


Bild 30. 3. Oberwelle im Strom eines Doppelmotors der 1 Do 1 Lok E 17 104 bei konstanten Motorspannungen. Fahrdrahtspannung = 102 vH, Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

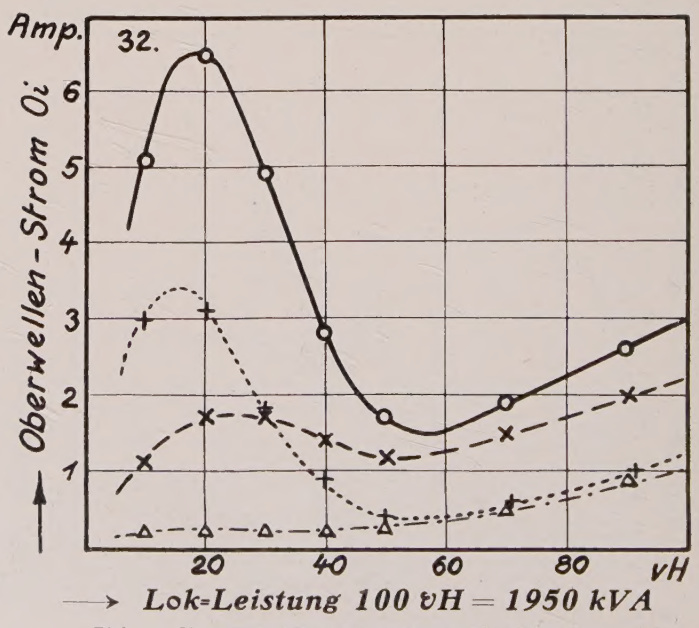


Bild 32. Oberwellenströme bei Lastfahrt der C + C Lok 91 104, Fahrdrahtspannung = 110 vH, Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

Die starke Verzerrung der Netzspannungskurve wurde dadurch herbeigeführt, daß im Gegensatz zu den vorher besprochenen Versuchen bei der Meßfahrt mit der Lokomotive E 17 104 die Strecke Nieder-Salzbrunn—Weißstein nicht vom übrigen Betriebe elektrisch abgetrennt, sondern normal gespeist war. Auf diese Erscheinung wird im Abschnitt B 3 näher eingegangen werden.

Noch deutlicher als aus den Bildern 19 bis 22 und 28 ist der Einfluß der Motoren zu erkennen, wenn man statt des Verhältniswertes von Oberwellen- zu Grundwellenamplitude die Effektivwerte der Oberwellenströme in Abhängigkeit von der Lokomotivleistung aufträgt. Diese lassen sich aus den Werten der angeführten Abbildungen ermitteln, wenn man für eine bestimmte Leistung den effektiven Fahrleitungsstrom und aus diesem wieder unter Berücksichtigung des Kurvenformfaktors den effektiven Grundwellenwert des Stromes errechnet. Da die Oberwellen in den obenstehenden Bildern in Hundertteilen des effektiven Grundwellenstromes angegeben wurden, sind damit auch die Effektivwerte der Oberwellenströme bekannt. Die auf diesem Wege aus Bild 19 ermittelten Werte ergeben das Bild 31, welches die Größe der effektiven Oberwellenströme, die in der Primärwicklung des Transformators fließen, in Abhängigkeit von der Lokomotivleistung darstellt und zeigt, daß der Transformatoreinfluß infolge der hohen Netzspannung bei weitem am stärksten ist.

Die Bilder 32 und 33 lassen dagegen infolge der verringerten Fahrdrahtspannung schon recht deutlich den Einfluß der Motoren erkennen, während die Oberwellenströme, welche durch die Transformatoren verursacht werden, abgenommen haben.

Einen anschaulichen Vergleich zwischen den Rückwirkungen hochgesättigter Transformatoren und dem Einfluß der Motoren auf die Stromkurve gestatten die Bilder 34 und 35. Bei der

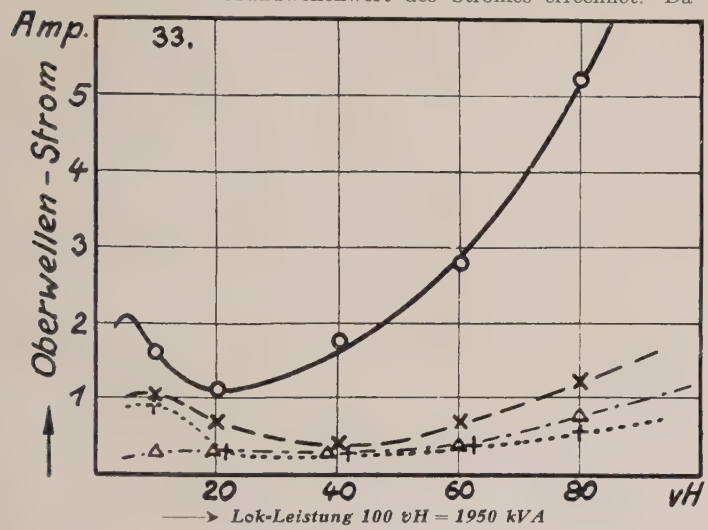


Bild 33. Oberwellenströme bei Lastfahrt der C + C Lok 91 104, Fahrdrahtspannung = 90 vH, Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

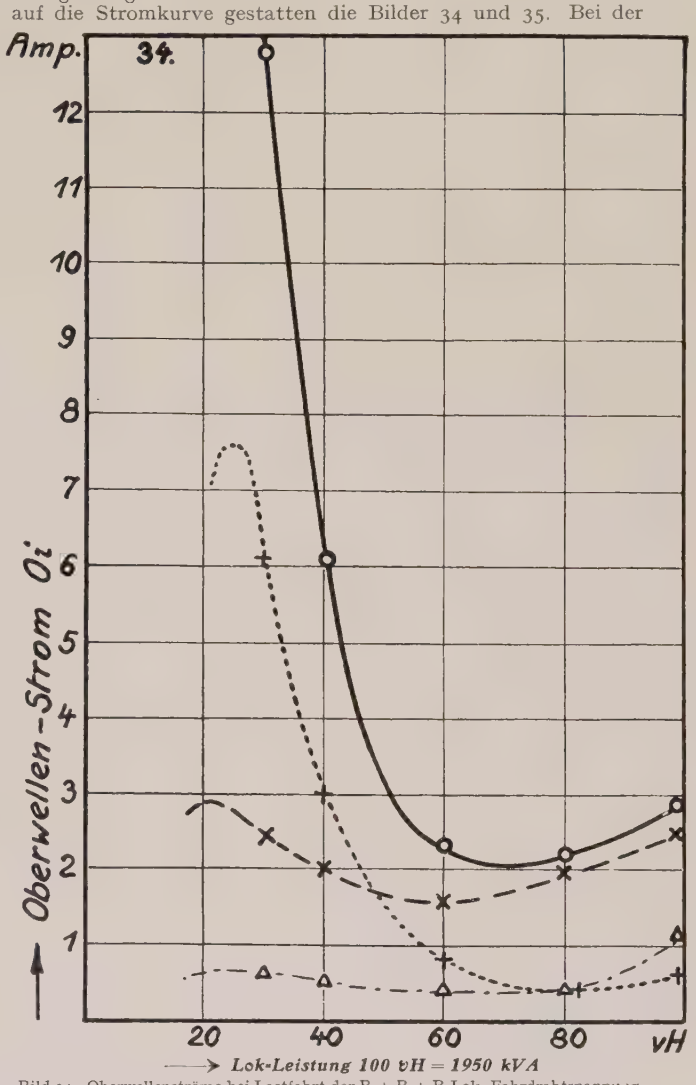


Bild 34. Oberwellenströme bei Lastfahrt der B + B + B Lok, Fahrdrahtspannung = 105 vH, Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

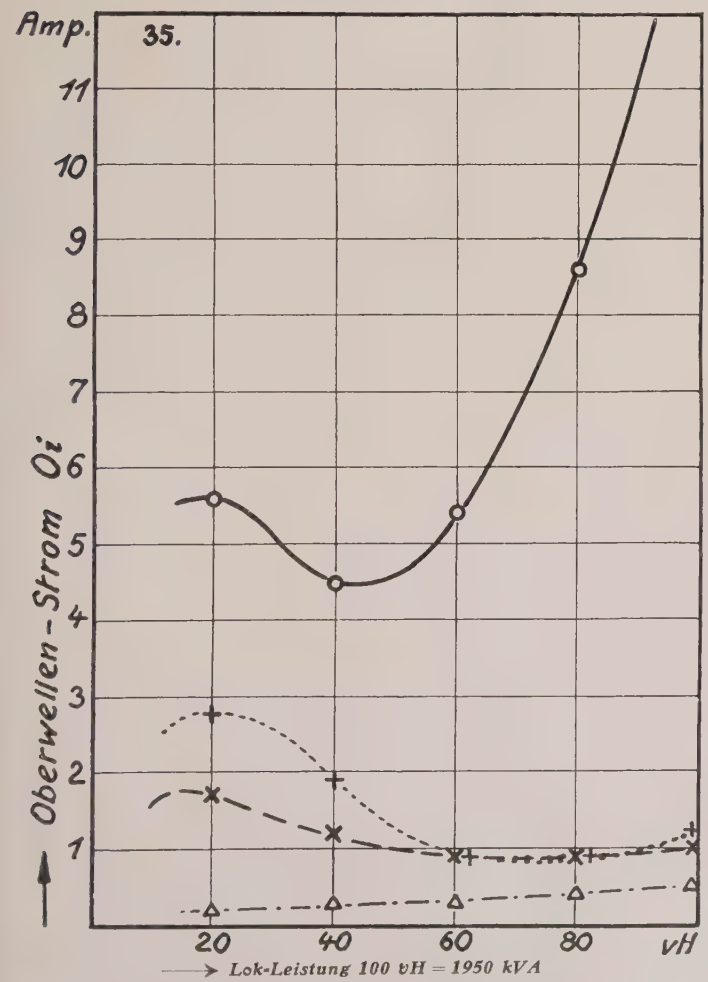


Bild 35. Oberwellenströme bei Lastfahrt der 1 Do 1 Lok E 17 119, Fahrdrahtspannung = 109 vH, Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

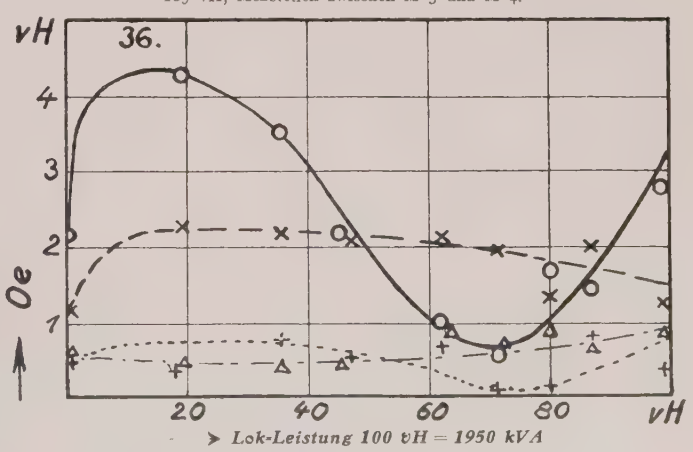


Bild 36. Spannungsoberwellen bei Lastfahrt der 1 Do 1 Lok E 17 119, Fahrdrahtspannung = 109 vH, Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

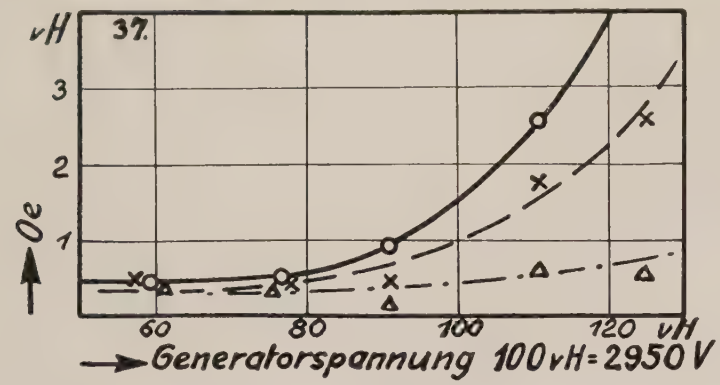


Bild 37. Spannungsoberwellen auf der Primärseite des Kraftwerks-Transformators, am Ende des Versuchsnetzes eine C + C Lok mit leerlaufendem Transformator.

Lastfahrt der B+B+B Lokomotive entstehen die im Hochspannungskreis fließenden Oberwellenströme in überwiegendem Maße infolge der hohen Transformator-Eisensättigung. Im Gegensatz hierzu zeigt Bild 35, daß bei dem Versuch mit der 1 Do 1 Lokomotive E 17 119 die Motoren einen weit größeren Einfluß auf die Höhe der Oberwellenströme der Frequenz 50 Hz ausüben als der Transformator.

Da sich die Oberwellenströme mit der Lokomotivleistung in ihrer Größe und Phasenlage stark ändern, erfährt auch die Form der Netzspannungskurve entsprechende Veränderungen. Diese Beziehungen kommen beispielsweise in einer Ähnlichkeit der Bilder 24 bis 26 einerseits und 31 bis 33 anderseits zum Ausdruck. Wie sich die Kurvenform der Fahrdrahtspannung bei der Fahrt der 1 Do 1 Lokomotive E 17 119 ändern kann, geht aus Bild 36 hervor. Aus dem Verlauf des Verhältniswertes der 3. Harmonischen ist auch hier bei hoher Leistung wieder deutlich der Einfluß der Motoren zu erkennen.

Ähnliche Abhängigkeiten zwischen Lokomotivleistung und Größe der Oberwellenamplituden in der Fahrdrahtspannung waren bei den Lastfahrten der beiden anderen Schnellzuglokomotiven 2 Do 1 und 1 Do 1, Reihe 16, festzustellen, während sich bei den Versuchen mit der 1 Co + Co 1 Lokomotive Werte ergaben, die sich mehr mit den in Bild 25 dargestellten decken.

Da die Verzerrung der Netzspannungskurve in starkem Maße von der Höhe der Lokomotivbelastung abhängig ist, werden sich vermutlich auch ganz verschiedene Verhältnisse ergeben, je nachdem, ob das Bahnnetz überwiegend Flachland- oder Gebirgsstrecken versorgt. Es ist anzunehmen, daß auf letzteren besonders starke Verzerrungen auftreten können; denn bei der Talfahrt laufen die Lokomotivtransformatoren fast leer, und bei der Bergfahrt sind sie hoch belastet, im Mittel prozentual viel höher als auf Flachlandstrecken. Nach den Bildern 25 und 36 erreicht in beiden Fällen, bei ganz geringer und bei hoher Lokomotivauslastung, die Spannung der 3. Oberwelle besonders hohe Werte. Bei mittlerer Lokomotivauslastung, wie sie auf Flachlandstrecken überwiegend vorkommt, ist dagegen die Spannung der 3. Harmonischen geringer.

Zum Schluß dieses Abschnittes sei noch die Rückwirkung der Oberwellenströme auf die Form der Spannungskurve des Generators erwähnt.

Die Verzerrungen der Spannungskurve auf der Primärseite des Kraftwerks-Transformators, also auch am Generator, sind außerordentlich gering, wenn der Transformator sekundär offen ist, vgl. Bild 6. Wird er aber belastet, Bild 37, so wachsen die Abweichungen der Spannung von der Sinusform, und zwar um so stärker, je höher die Oberwellenströme sind, welche von den eisengesättigten Netzgliedern aufgenommen werden. Die Differenz aus den Werten der Bilder 6 und 37 ergibt die Rückwirkung des leerlaufenden Unterwerks- und des Lokomotiv-Transformators auf die Spannungskurve am Kraftwerk. Sie ist in Bild 38 dargestellt. Der Einfluß des Lokomotivtransformators ist hierbei wegen der höheren Eisensättigung weit größer als der des Unterwerkstransformators. Als Ursache dieser Rückwirkung sind wieder die von den Oberwellenströmen erzeugten Spannungsabfälle zu nennen. Ferner ist anzunehmen, daß die Oberwellenströme auch die Feldkurve des Generators direkt beeinflussen.

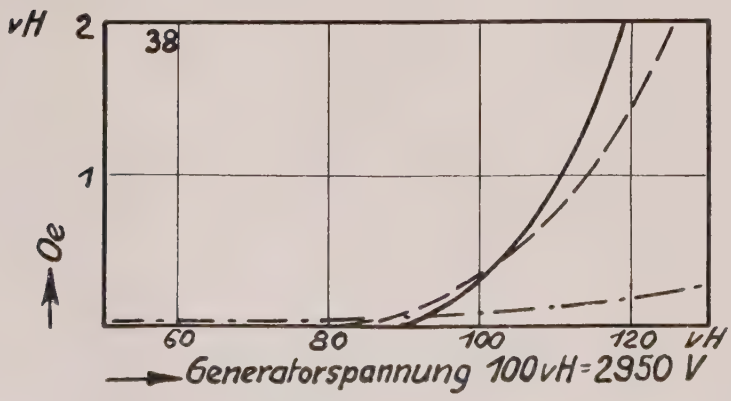


Bild 38. Rückwirkung der Netzbelastung auf die Höhe der Spannungsoberwellen im Kraftwerk, Meßstelle M 1.

3. Prozentuale und effektive Werte der Oberwellen im Betriebsnetz.

Die bisher besprochenen Versuche fanden in einem besonderen, vom übrigen Betriebe getrennten Netz statt, das, abgesehen von den Versuchen zu Bild 18, bei den Meßfahrten immer nur mit einer einzigen Lokomotive belastet war. Da jedes hinzukommende Fahrzeug die Kurvenform der Netzspannung je nach seinem Belastungszustand weiter verzerrt, vgl. Bild 18, treten im Betriebsnetz entsprechend der größeren Anzahl gleichzeitiger Zugfahrten Spannungsoberwellen auf, welche die im Versuchsnetz gefundenen Werte erheblich übersteigen.

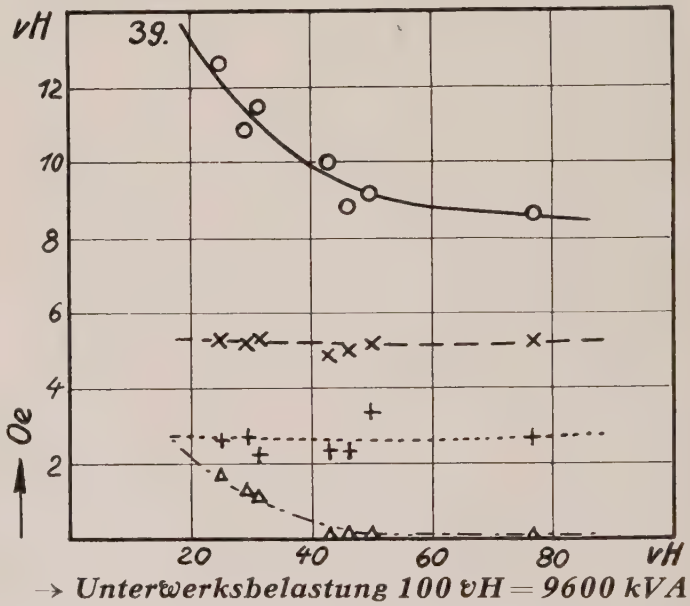


Bild 39. Spannungsoberwellen in der Fahrdrahtspannung des Betriebsnetzes, Speisebezirke normal geschaltet, Fahrdrahtspannung = 107 vH, Meßstelle M 2.

Welche prozentualen Beträge die Oberwellenspannungen am Unterwerk Nieder Salzbrunn im normalen Betrieb erreichen, zeigt Bild 39. Die Werte sind wieder in Abhängigkeit von der Leistung aufgetragen, und zwar entsprechen 100 vH der Unterwerksdauerleistung = 9600 kVA. Das Unterwerk Nieder Salzbrunn liegt etwa in der Mitte des schlesischen Bahnnetzes. Aber auch an den übrigen Speisepunkten, einschließlich der Netzenden, treten im Durchschnitt annähernd gleich große Oberwellenspannungen auf, wie die im Bild 39 angegebenen, was durch Messungen in Breslau, Hirschberg und Lauban festgestellt wurde. Die Gründe hierfür dürften in der annähernd gleichmäßigen Verteilung der Zugfahrten auf die Unterwerksbezirke zu suchen sein und darin, daß ein Ausgleich der Oberwellenspannungen von Unterwerk zu Unterwerk über die verhältnismäßig kurze Fernleitung ohne große Verluste erfolgen kann. Die am Unterwerk Nieder Salzbrunn gemessenen Oberwellenspannungen, Bild 39, können also auch als betriebsmäßige Mittelwerte für das gesamte übrige Netz angenommen werden. Die Form der Spannungskurve ist stets spitz, der Scheitelwert liegt je nach der Belastung 90 bis etwa 105 elektrische Grade gegen den Nulldurchgang verschoben.

Da im Betriebsnetz die Abweichungen der Spannungskurve von der Sinusform größer als im Versuchsnetz sind, können unter diesen Bedingungen die Oberwellenströme bei einer betriebsmäßigen Lokomotivfahrt höhere Werte erreichen als sie im vorigen Abschnitt für das Versuchsnetz angegeben wurden. Auf diese Tatsache wurde bereits bei Besprechung der Bilder 29 und 30 hingewiesen. Die Zunahme der Stromverzerrungen in-

folge der schlechteren Spannungskurve ist bei gewissen Belastungen und Fahrgeschwindigkeiten nicht unbeträchtlich. So betrug beispielsweise der Verhältniswert der 3. Oberwelle bei der Fahrt einer 1 Do 1 Lokomotive im Versuchsnetz zwischen 60 und 100 vH der Lokomotivleistung etwa 7 bis 12 vH des Fahrleitungs-Grundwellenstromes, Bild 28. Bei gleicher Höhe der Fahrdrahtspannung, aber betriebsmäßiger Speisung der Strecke, stieg der Verhältniswert im Bereich der genannten Leistungen auf 16 bis 19 vH, war also im Mittel fast doppelt so hoch.

Die in den einzelnen Fahrleitungsabschnitten teils von den Lokomotivtransformatoren und Motoren verursachten, teils als Folge der nicht sinusförmigen Netzspannung fließenden Oberwellenströme addieren sich geometrisch an den Speisepunkten und erreichen beispielsweise in der Sammelschiene des Unterwerks Nieder Salzbrunn z. T. ganz beträchtliche Effektivwerte, wie Bild 40 zeigt.

Die Rückwirkung der Oberwellenströme auf die Spannungskurve am Unterwerk muß um so ungünstiger werden, je größer man den Speisebezirk wählt. Denn es wächst damit die Zahl der vom Unterwerk gespeisten Lokomotiven, also auch die effektive Höhe der Oberwellenströme. Diese Annahme wird durch einen Versuch bestätigt, Bild 41, bei dem der normale Speisebezirk des Unterwerks Nieder Salzbrunn von etwa 230 km Gleislänge auf 285 km vergrößert wurde. Durch Vergleich mit Bild 39 ist festzustellen, daß die Spannung sämtlicher Oberwellen mit Ausnahme der 5. Harmonischen bei kleinen und mittleren Unterwerksbelastungen zugenommen hat. Im übrigen zeigt Bild 41 wieder, daß die Verhältniswerte der 3. Oberwelle mit der Leistung stark abnehmen, während der Spannungsanteil der 5. Harmonischen annähernd konstant bleibt.

Die gesamte Zugförderungsenergie wird dem schlesischen Netz durch die 80 kV-Leitung Mittelsteine—Nieder Salzbrunn zugeführt. In ihr fließt also auch die geometrische Summe aller im Betriebsnetz auftretenden Oberwellenströme. Welche Effektivwerte hierbei auftreten, zeigt Bild 42. Die Meßpunkte sind in Abhängigkeit von der Kraftwerksleistung aufgetragen. 100 vH entsprechen 16 400 kVA, das ist die Dauerleistung der am Versuch beteiligten Generatoren. Die Spannung betrug im Mittel 107 vH = 80,7 kV.

Schließlich sind noch die Oberwellenwerte zu nennen, die bei normalem Betrieb in der Kraftwerksspannung auftreten, Bild 43. Gemessen wurde hierbei an der 80 kV-Sammelschiene. Aus einem Vergleich der Bilder 39 und 43 darf aber nicht der Schluß gezogen werden, daß die Hundertsätze der Spannungsoberwellen am Kraftwerk bei entsprechenden Belastungen erheblich kleiner wären als am Unterwerk. Es ist hierbei zu berücksichtigen, daß bei einer Fahrdrahtspannung von 107 vH die Spannung am Kraftwerk um die Verluste der Fernleitung und Umformung höher sein muß. Damit würden sich in Wirklichkeit auch größere Oberwellenwerte ergeben als in Bild 43, das für die im Verhältnis etwas zu niedrige Kraftwerksspannung von 107 vH gilt. Für einen genauen Vergleich hätte die Spannung am Kraftwerk im Mittel etwa 112 vH betragen müssen.

Damit soll die Besprechung der betriebsmäßig auftretenden Oberwellen niedriger Frequenz beendet werden. Sie erreichen an sämtlichen Punkten des Netzes Werte, die es rastsam erscheinen lassen, diesen Abweichungen von der Sinusform und ihren Folgeerscheinungen erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken.

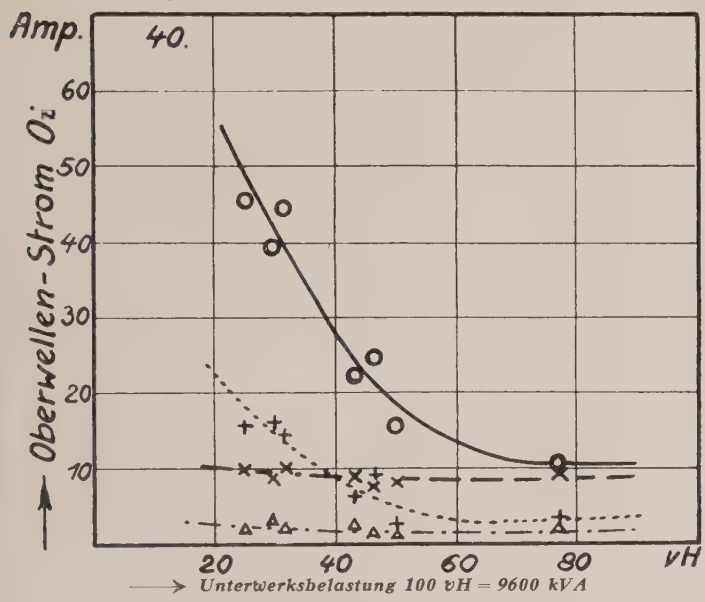


Bild 40. Oberwellenströme in der 15 kV-Sammelschiene des Unterwerks Nieder Salzbrunn, Speisebezirke normal geschaltet, Fahrdrahtspannung = 107 vH.

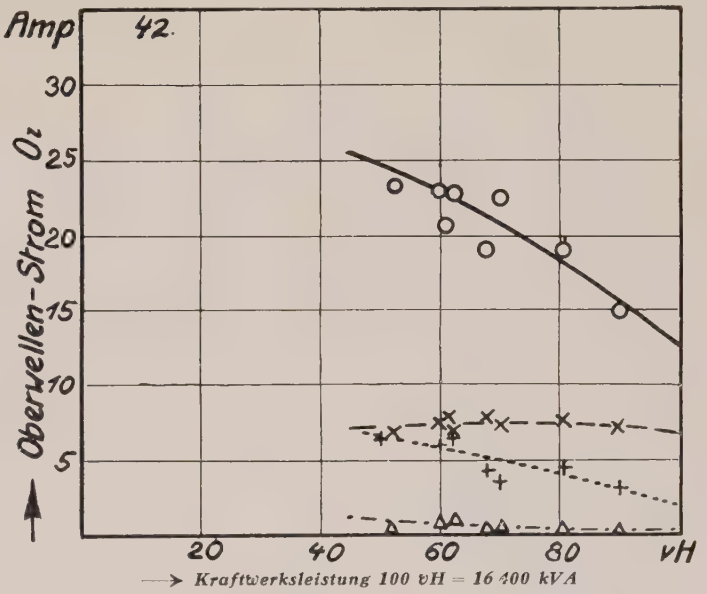


Bild 42. Oberwellenströme in der 80 kV-Sammelschiene des Kraftwerks, Spannung = 107 vH, Meßstelle M 1.

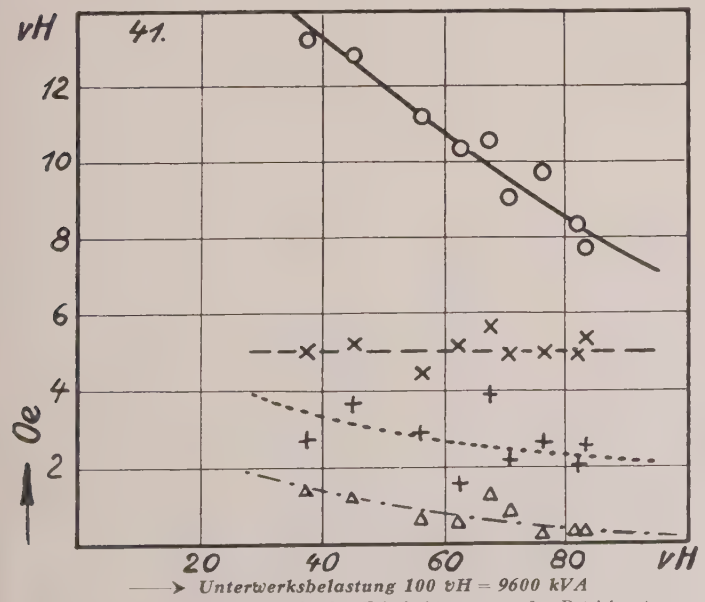


Bild 41. Spannungsoberwellen in der Fahrdrahtspannung des Betriebsnetzes, Speisebezirk des Unterwerks Nieder Salzbrunn vergrößert, Spannung = 105 vH.

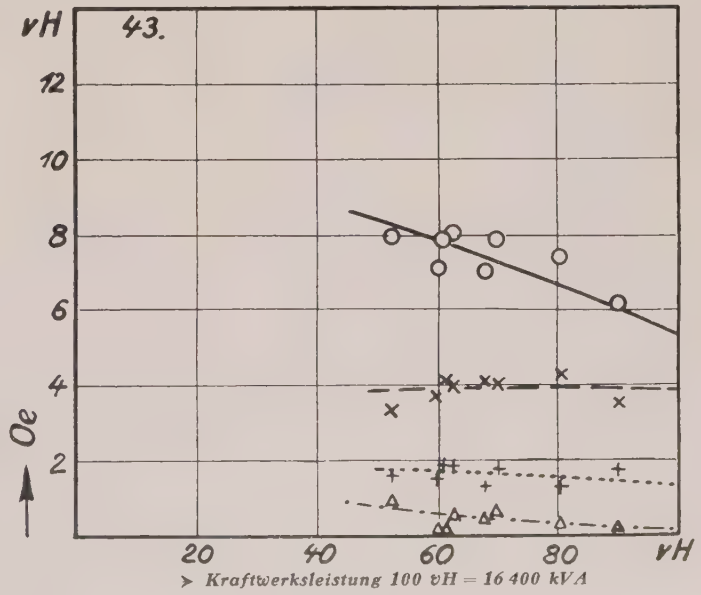


Bild 43. Spannungsoberwellen am Kraftwerk, Fernleitungsspannung = 107 vH.

C. Die Oberwellen höherer Frequenz.

Die obere Grenze für die Gruppe der niederfrequenten Oberwellen war bei der 9. Harmonischen gezogen worden. Es sollen nun die Oberwellen höherer Frequenz behandelt werden, deren Wechselzahl 200 Hz übersteigt, und zwar zunächst diejenigen, deren Meßwerte in der Fahrdrahtspannung oder im Fahrdrahtstrom ermittelt wurden. Wie derartige, in der Fahrdrahtspannung auftretende Oberwellen im Oszillogramm aussehen, war bereits in Bild 3 gezeigt worden.

Die im schlesischen Bahnnetz vorkommenden Oberwellen höherer Frequenz werden in der Hauptsache durch Nutenpulsationen der Motoren verursacht. Dies geht aus der Abhängigkeit der beobachteten Frequenzen von der Nuten- und Drehzahl der Motoren hervor. An der Erzeugung der Oberwellen sind in erster Linie die Hauptmotoren beteiligt. Aber auch die Hilfsmotoren, die z. T. noch mit geraden Nuten ausgeführt sind, liefern einen, wenn auch geringen Anteil. Vergleichsmessungen im Versuchsnetz bei ein- und abgeschalteten Hilfsmotoren zeigen, daß diese Oberwellen im Oszillogramm der Fahrdrahtspannung noch deutlich zu erkennen sind. Die Amplitudenwerte der von den Hauptmotoren erzeugten Nutenoberwellen sind vom Motorstrom, von der Fahrzeuggattung und vom Leitungswiderstand abhängig. Lokomotiven mit einem großen Motor sind in dieser Beziehung ungünstiger als solche mit mehreren Triebmotoren kleinerer Leistung[14]). Von den untersuchten Fahrzeugen traten an der 1 Co + Co 1 Lokomotive die niedrigsten Oberwellenspannungen auf.

Welchen Einfluß die Kapazität des Fahrleitungsnetzes auf die Höhe der Oberwellenamplituden hat, läßt folgender Vergleich erkennen: Bei den Meßfahrten im getrennt gespeisten Versuchsnetz betrug die Oberwellenspannung direkt am Fahrzeug im Mittel 2 vH, im Höchstfalle 4,3 vH der Fahrdrahtspannung, das sind 670 V. Die Höchstwerte verteilten sich aber nicht auf einen weiten Frequenzbereich, sondern traten bei sämtlichen Fahrzeugen zwischen 1000 und 1300 Hz auf. Wenn diese Erscheinung auf Resonanz mit der Eigenschwingung des Fahrleitungskreises beruht, so müssen die Höchstwerte bei tieferen Frequenzen auftreten, sobald man den Fahrleitungsbezirk vergrößert, da hiermit die Leitungskapazität wächst. Tatsächlich ergaben die Meßfahrten bei Einschaltung der kurzen Versuchsstrecken in das ausgedehnte, normale Betriebsnetz, daß die Höchstwerte der Oberwellenspannungen hier stets bei Frequenzen von 500 bis 600 Hz auftraten.

Während die Amplituden der niederfrequenten, durch gesättigte Eisenteile verursachten Oberwellen im Betriebsnetz weit größere Werte erreichten als im Versuchsnetz, ist das bei den Oberwellen höherer Frequenz nicht der Fall. So wurden auf der betriebsmäßig gespeisten Strecke Nieder Salzbrunn—Fellhammer an der 1 Do 1 Lokomotive E 17 119 nur Mittelwerte von 1,2 vH und Spitzenwerte von 2,2 vH der Fahrdrahtspannung beobachtet gegen 2,1 vH im Mittel und 4,3 vH im Höchstfalle am gleichen Fahrzeug, aber bei getrennter Speisung der Strecke. Der höchste Oberwellenwert, der während der gesamten Messungen im Betriebsnetz festgestellt werden konnte, betrug 2,5 vH der Fahrdrahtspannung. Die obere Frequenzgrenze derjenigen Oberwellen, die in den Oszillogrammen der Fahrdrahtspannung noch sichtbar sind, liegt bei etwa 3500 Hz.

Die bisher angegebenen Amplitudenwerte beziehen sich sämtlich auf Messungen, die unmittelbar am Fahrzeug ausgeführt wurden. Infolge der Leitungsverluste nimmt die Oberwellenspannung mit der Entfernung des Fahrzeuges von der Meßstelle stark ab. So wurden im Versuchsnetz in einem Abstand von 8 km von einer C + C Lokomotive nur höchste Werte von 2,4 vH der Fahrdrahtspannung beobachtet, gegen 3,6 vH in unmittelbarer Nähe des gleichen Fahrzeuges. Ähnlich sind die Ergebnisse der Messungen im Betriebsnetz.

Die höchsten Oberwellenspannungen treten in den Motorstromkreisen auf. Wie bereits erwähnt, sind ihre Amplituden von den Arbeitsbedingungen der Motoren abhängig und bei den einzelnen Lokomotivgattungen sehr unterschiedlich. Hierfür ausführliche Zahlenwerte anzugeben, würde aber den Rahmen dieser Untersuchung überschreiten.

Die Amplituden der im Fahrleitungskreis fließenden Oberwellenströme höherer Frequenz sind bei der Fahrt einer einzigen Lokomotive, wenigstens bei allen neueren, mit mehreren Motoren ausgerüsteten Gattungen, so klein, daß sie im Oszillogramm des Fahrdrahtstromes nicht mehr zu erkennen sind. Sie lassen sich nur unter Zwischenschaltung von Kondensatoren bestimmen[15]). Am Unterwerk, wo sich die frequenzgleichen Oberwellenströme der einzelnen Fahrleitungsabschnitte geometrisch addieren, treten jedoch in den Oszillogrammen des Sammelschienenstromes die höherfrequenten Oberwellen mitunter deutlich hervor. Als höchster effektiver Wert wurde am Unterwerk Nieder Salzbrunn ein Oberwellenstrom von 6,1 A bei 530 Hz gemessen.

Außer den Lokomotivmotoren sind auch die Generatoren im Kraftwerk Erzeuger von Nutenoberwellen. Allerdings erreichen deren Amplituden erheblich geringere Werte, und zwar nur etwa 0,2 vH der Generatorspannung. Annähernd der gleiche Hundertsatz gilt auch für die Oberwellen in der Fernleitungsspannung. Die im Fahrleitungsnetz auftretenden höheren Harmonischen werden nur zu einem verschwindend geringen Teil auf das 80 kV-Fernleitungsnetz übertragen.

Die vorstehend genannten Zahlen lassen erkennen, daß höherfrequente Oberwellen im schlesischen Bahnnetz hauptsächlich in den Fahrleitungskreisen auftreten, dort aber z. T. recht beachtliche Werte annehmen, trotzdem die Triebmotoren sämtlicher Lokomotiven mit schrägen Nuten ausgeführt sind.

D. Der störende Einfluß der Oberwellen.

1. Leistung und Kommutierung der Motoren.

Das Vorhandensein von Oberwellen in den Motorströmen bringt es mit sich, daß die Motoren höhere Verluste aufweisen und infolgedessen Leistungsfaktor und Wirkungsgrad geringer sind als bei sinusförmigem Stromverlauf[16]). Diese Erscheinung ist sehr unerwünscht, noch störender für den Betrieb ist aber der Einfluß der Oberwellen auf die Kommutierung.

Bekanntlich ist bei einem Einphasen-Reihenschlußmotor die Güte der Kommutierung von der Höhe der transformatorischen Spannung in den kurzgeschlossenen Windungen abhängig, und zwar nicht allein von ihrem Effektivwert, sondern auch vom Scheitelwert. Dieser steht aber in enger Beziehung zu dem prozentualen Anteil der Oberwellen im Motorstrom[17]).

Die ungünstigsten Kommutierungsverhältnisse treten im allgemeinen bei schweren Anfahrten auf, da hier infolge der hohen und stark verzerrten Motorströme besonders hohe Momentanwerte der transformatorischen Spannung erzeugt werden. Es kommt hinzu, daß die Kollektorsegmente unter den kommutierenden Bürsten wegen der geringen Motordrehzahl besonders lange dem zerstörenden Einfluß der starken Kurzschlußströme ausgesetzt sind. Da Einbrennungen in den Segmenten meist zu einer bleibenden Kontaktverschlechterung und so zu einer Verstärkung des Bürstenfeuers führen, sind die Kommutierungsverhältnisse beim Anfahren für die Laufleistung eines Kollektors von außerordentlicher Bedeutung.

Obwohl bei höheren Fahrgeschwindigkeiten die effektiven Motorströme kleiner sind, können auch hier unter dem Einfluß der Oberwellen noch erhebliche Momentanwerte der Bürstenspannung und damit Kommutierungsschwierigkeiten auftreten, besonders wenn dieser elektrische Zustand längere Zeit anhält. Denn infolge des verstärkten Bürstenfeuers kann der Kollektor schließlich Temperaturen annehmen, die ein Verziehen der Segmente und als weitere Folge ein noch höheres Bürstenfeuer, Kohlenbruch und mitunter sogar Überschläge am Kollektor mit sich bringen können. Wie durch Messungen im schlesischen Netz und durch Versuche in der Kohlenprüfstelle Hirschberg festgestellt wurde, können die Oberwellen im Motorstrom auch einen starken Einfluß auf die Abnutzung der Kohlebürsten haben[18]).

An den schädlichen Einflüssen auf die Kommutierung sind nicht allein die niederfrequenten Oberwellen beteiligt, die durch zu hohe Eisensättigung des Motors oder infolge einer nicht sinusförmigen Spannung des Lokomotivtransformators entstehen, sondern auch die Oberwellen höherer Frequenz, welche in der Nutung des Motors ihre Ursache haben[19]). Wenn auch die Oberwellen für eine ungünstige Kommutierung nicht allein verantwortlich zu machen sind, so ist immerhin ihr Einfluß auf die Laufzeit der Kollektoren, ferner auf die Leistung und Betriebssicherheit der Motoren von beträchtlichem Einfluß.

Es hat sich häufig gezeigt, daß an Motoren, die im Prüffeld einwandfrei liefen, beim Betrieb im Bahnnetz Kommutierungsschwierigkeiten auftraten, da die Spannungskurve des Netzes stärkere Verzerrungen aufwies als die des Prüfgenerators. Zur Vermeidung von Fehlschlägen und kostspieligen Änderungen wird es sich empfehlen, künftig schon im Prüffeld elektrische Verhältnisse nachzuahmen, die denen im Betriebsnetz möglichst nahe kommen, und unter diesen Bedingungen die Kommutierung des Probemotors zu untersuchen.

2. Beeinflussung benachbarter Stromkreise.

Die im Fahrleitungskreis auftretenden Oberwellen und Ströme erzeugen in den parallel zum Gleis verlaufenden Freileitungen infolge induktiver und kapazitiver Kopplung starke Stör-

[14]) Vergl.: Jäger, Quantitative Messung der Fernsprechstörwirkung von Stromerzeugern und -verbrauchern als Oberschwingungsgeneratoren, Elektrische Bahnen 1926, S. 345.

[15]) Vergl.: Jäger, Quantitative Messung der Fernsprechstörwirkung von Stromerzeugern und -verbrauchern als Oberschwingungsgeneratoren, Elektrische Bahnen 1926, S. 340.

[16]) Vergl.: Töfflinger, Der Einphasen-Bahnmotor, Verlag Oldenbourg, S. 8 und 37.

[17]) Vergl.: Töfflinger, Der Einphasen-Bahnmotor, Verlag Oldenbourg, S. 15/17 und 41.

[18]) Vergl.: Kasperowski, Über den Einfluß der Kurvenform des Motorstromes auf die Abnutzung von Kohlebürsten, Elektr. Bahnen 1932, S. 120.

[19]) Vergl.: Heinrich, Das Bürstenproblem im Elektromaschinenbau, Verlag Oldenbourg, S. 113/114 und 124.

spannungen. Besonders werden hiervon die Fernsprechleitungen betroffen.

Auf Strecken mit starker Zugfolge ist in der Regel trotz Verwendung von Übertragern und verdrillten Leitungen keine ausreichende Verständigung möglich. Eine wichtige Rolle spielen hierbei die Nutenoberwellen. Obwohl ihr prozentualer Anteil in den Fahrdrahtströmen verhältnismäßig klein ist, können sie doch infolge ihrer hohen Frequenz beträchtliche Induktionsspannungen erzeugen. Es kommt hinzu, daß sie im Bereich der Sprachfrequenzen liegen und auch diejenigen Periodenzahlen umfassen, bei denen die Ohrempfindlichkeit am stärksten ist[20]). Gelänge es, die Oberwellenspannungen und -ströme in den Fahrleitungskreisen auf ein erträgliches Maß zu beschränken, so würden bei einem großen Teil neu zu elektrisierender Strecken die hohen Aufwendungen für Verkabelung der Fernmeldeleitungen gespart werden können. Es wäre dann lediglich durch bekannte Maßnahmen, z. B. durch Verwendung von Übertragern und hochspannungssicheren Fernsprechapparaten, dafür zu sorgen, daß keine Gefährdung der Sprechenden bei Kurzschlüssen im Fahrleitungskreis eintritt.

Die störende Beeinflussung durch Oberwellen hat auch für die Einführung von Verbesserungen im elektrischen Zugbetrieb Bedeutung. Der von Reichsbahnoberrat Schlemmer auf der Weltkraftkonferenz 1930 vorgetragene Bericht über „Erhöhung der Betriebssicherheit der Eisenbahnen durch Einführung der elektrischen Zugförderung" enthält wichtige Vorschläge für eine selbsttätige Sicherung von Zügen[21]). Um die gefahrbringende Annäherung zweier Fahrzeuge zu verhindern, ist beabsichtigt, der Fahrdrahtspannung Oberwellen verschiedener Frequenz zu überlagern, welche entsprechende Anzeigevorrichtungen auslösen sollen. Dieser Verbesserungsvorschlag dürfte sich aber kaum verwirklichen lassen, wenn die Fahrdrahtspannung bereits Oberwellen mit so hohen Amplituden enthält, wie sie im schlesischen Bahnnetz auftreten. Denn es ist zu erwarten, daß diese die Auslösestromkreise auf den Lokomotiven in sehr störender Weise beeinflussen würden. Aus dem gleichen Grunde ist auch eine zuverlässige Nachrichtenübermittlung durch Hochfrequenztelephonie längs der Fahrleitung zurzeit noch unmöglich.

3. Einleitung von Kurzschlüssen.

Es ist bereits erwähnt worden, daß Oberwellen im Motorstrom zu starkem Bürsten- und Rundfeuer führen können. Dieses wirkt in hohem Maße ionisierend und verursacht daher mitunter Kurzschlüsse. Bei ungünstiger Kommutierung tritt außerdem häufig eine starke Verstaubung der Kohlebürsten ein, deren isolationverschlechternde Wirkung sich trotz kräftiger Lüftung nicht immer beseitigen läßt. Die mittelbare Folge der Oberwellen können also Kurzschlüsse am Motor sein, die wieder Überspannungen und weitere Überschläge an anderen Stellen verursachen können. Neben Lokomotivbeschädigungen bringen derartige Kurzschlüsse meistens auch empfindliche Störungen im Zugbetrieb mit sich.

Infolge des Platzmangels auf Lokomotiven müssen die Isolationsabstände häufig sehr klein bemessen werden, um so unerwünschter sind daher Überspannungen. Für die Überschlagsgefahr ist der Scheitelwert der Spannung maßgebend, dieser ist aber beim Vorhandensein von Oberwellen in der Regel größer als bei sinusförmiger Grundwelle.

[20]) Vergl.: Jäger, Quantitative Messung der Fernsprechstörwirkung von Stromerzeugern und -verbrauchern als Oberschwingungsgeneratoren, Elektr. Bahnen 1926, S. 338.

[21]) Vergl.: Zweite Weltkraftkonferenz 1930 Gesamtbericht, Sektion 26, Bericht Nr. 50, VDI-Verlag.

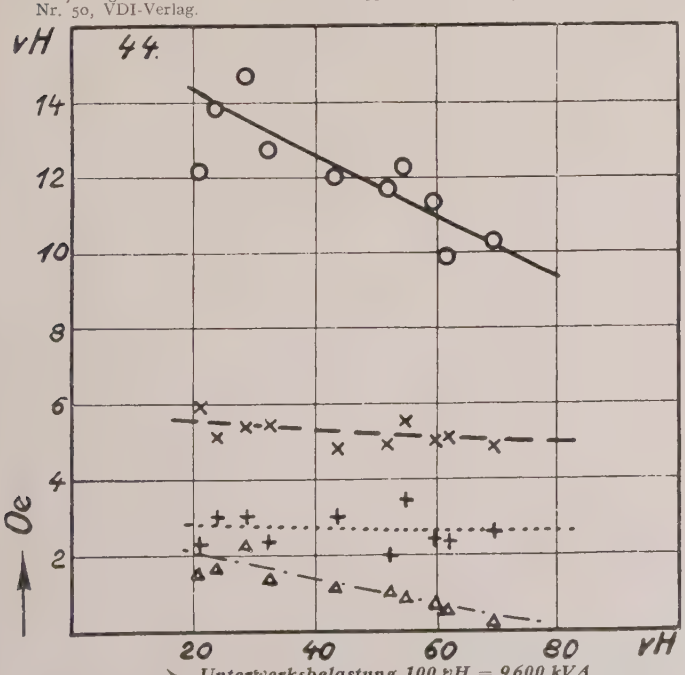


Bild 44. Spannungsoberwellen in der Fahrdrahtspannung am Unterwerk Nieder Salzbrunn bei ausgelasteten Transformatoren, Fahrdrahtspannung = 105 vH, Meßstelle M 2.

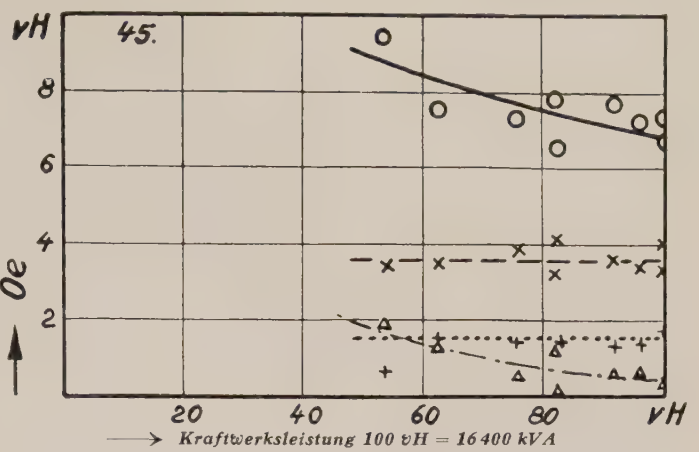


Bild 45. Spannungsoberwellen am Kraftwerk bei ausgelasteten Unterwerkstransformatoren, Fernleitungsspannung = 107 vH, Meßstelle M 1.

E. Die Beseitigung der Oberwellen.

Ein von der Sinusform abweichender Strom- und Spannungsverlauf beeinträchtigt die Motorleistung, verkürzt die Laufzeit der Kollektoren und kann zu Störungen Anlaß geben, ist also äußerst unerwünscht. Während eine ausreichende Beseitigung der höherfrequenten Oberwellen große technische Schwierigkeiten bereitet, verschwinden die Oberwellen niedriger Frequenz fast gänzlich, wenn man Generatoren, Transformatoren und Motoren mit sehr kleiner Eisensättigung verwendet. Es wird sich bei einem weiteren Ausbau elektrischer Bahnnetze empfehlen, die Eiseninduktionen nicht zu hoch zu wählen. Eine vollständige Beseitigung der niederfrequenten Oberwellen auf diesem Wege wird aber an den erhöhten Kosten der Transformatoren und Motoren, ferner an den beschränkten Raumverhältnissen auf den Fahrzeugen scheitern. Auch bei vorhandenen Anlagen wird dieses Mittel fast durchweg unanwendbar sein. Es erscheint daher angebracht, die Beseitigung der niederfrequenten Oberwellen auf anderem Wege zu versuchen. Zunächst seien Maßnahmen auf ihre Wirksamkeit untersucht, die keine besonderen Geldaufwendungen erfordern.

1. Auslastung der Transformatoren.

Aus den Bildern 39, 41 und 43 geht hervor, daß die Spannung aller Oberwellen mit Ausnahme der 5. Harmonischen mit zunehmender Belastung kleiner wird. Es liegt daher nahe, die Verzerrungen der Netzspannungskurve durch eine gute Auslastung der Transformatoren zu verringern. Dies kann beispielsweise dadurch geschehen, daß man in den Unterwerken einen Teil der Transformatoren abschaltet.

Bei Aufnahme der Meßwerte, die im Bild 39 eingetragen sind, waren im Unterwerk Nieder Salzbrunn drei Transformatoren je 3200 kVA im Betrieb. Bild 44 zeigt die Spannungswerte der Oberwellen bei nur zwei eingeschalteten Transformatoren. Es läßt erkennen, daß der erhoffte Erfolg der besseren Auslastung ausgeblieben ist. Ähnliche Ergebnisse liefern Vergleichsmessungen am Kraftwerk. Bei diesem Versuch waren die Transformatorleistungen folgendermaßen vermindert:

im Unterwerk Lauban . . . . . von 6400 auf 4800 kVA,
„ „ Hirschberg . . . . „ 8000 „ 6400 „ ,
„ „ Nieder Salzbrunn . „ 9600 „ 6400 „ .

Trotz Herabsetzung der eingeschalteten Transformatorleistung von 24 000 auf 17 600 kVA haben sich die Anteilwerte der Oberwellenspannungen nicht nennenswert geändert, wie ein Vergleich der Bilder 43 und 45 zeigt. Dieses Versuchsergebnis bestätigt wieder, daß der Einfluß der Unterwerke im schlesischen Bahnnetz gering ist gegenüber der Oberwellenerzeugung durch Lokomotivtransformatoren und Motoren. Für deren ständige Auslastung zu sorgen, wird aber aus Betriebsgründen nur in den seltensten Fällen möglich sein.

2. Herabsetzung der Netzspannung.

Die eingangs beschriebenen Leerlaufversuche zeigten deutlich, wie stark die Oberwellenamplituden mit sinkender Netzspannung abnehmen, vgl. Bilder 13 und 15. Durch eine Span-

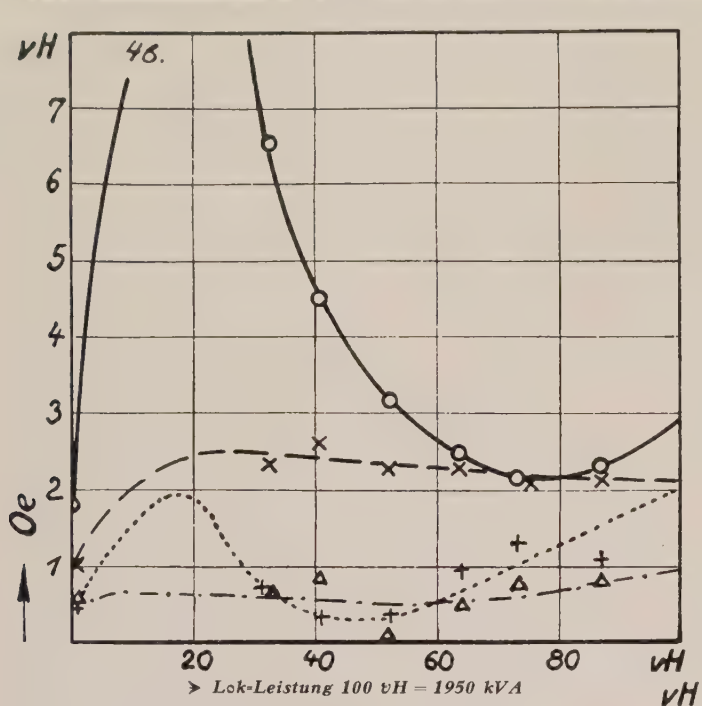


Bild 46. Spannungsoberwellen bei Lastfahrt der B + B + B Lok, Spannung am Transformator = 105 vH, Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

nungssenkung kann man also die gleiche Wirkung erzielen wie durch Verwendung schwachgesättigter Transformatoren bei normaler Spannung. Ein Vergleich der Bilder 46 und 47 ergibt beispielsweise, daß der Oberwellenanteil in der Fahrdrahtspannung bei der Lastfahrt einer B + B + B Lokomotive abnimmt, wenn die dem Transformator zugeführte Spannung im Mittel um etwa 11 vH herabgesetzt wird.

Bei dem zuletzt genannten Versuch, der auf der getrennt gespeisten Strecke Nieder Salzbrunn—Fellhammer stattfand, war den Lokomotivtransformatoren ein regelbarer Hochspannungs-Wasserwiderstand vorgeschaltet, vgl. Bild 1 a. Dieser wurde stets so eingestellt, daß er bei allen Belastungen einen gleichbleibenden Spannungsabfall erzeugte. Dadurch wurde die Eiseninduktion der Lokomotivtransformatoren um einen bestimmten Betrag verringert, ohne daß an den Spannungs- und Sättigungsverhältnissen im übrigen Netz eine Änderung eintrat. Die Abnahme der Oberwellen in der Netzspannung ist also bei diesem Versuch auf die verringerte Eiseninduktion der Lokomotivtransformatoren allein zurückzuführen. Eine noch weitgehendere Verbesserung der Netzspannungskurve läßt sich erzielen, wenn man schon am Kraftwerk die Spannung herabsetzt, da hierdurch die Eisensättigung sämtlicher Netzglieder geändert wird.

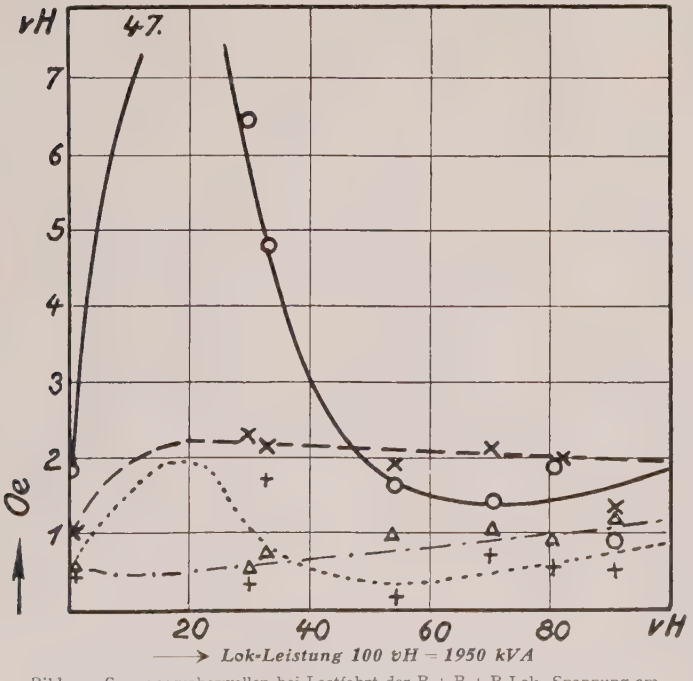


Bild 47. Spannungsoberwellen bei Lastfahrt der B + B + B Lok, Spannung am Transformator = 93,6 vH bei einer Fahrdrahtspannung von 105 vH Meßstellen zwischen M 3 und M 4.

Senkt man die Fahrdrahtspannung des Betriebsnetzes von 16,1 auf 13,2 kV, also um 18 vH, so enthält die Spannungskurve am Unterwerk Nieder Salzbrunn nur noch die in Bild 48 eingezeichneten Oberwellenwerte, vgl. Bild 39.

Ähnlich sind die Meßergebnisse am Kraftwerk. Die Netzspannung war hier von 80,7 auf 69,0 kV, also um 14,5 vH, gesenkt worden. Die Verbesserung des Strom- und Spannungskurvenverlaufes ergibt sich aus dem Vergleich der Bilder 42 und 43 mit den Bildern 49 und 50. Bei einer Kraftwerksleistung von beispielsweise 50 vH beträgt der prozentuale Spannungswert der 3. Harmonischen nur noch den dritten Teil, die fünfte Oberwelle ist auf den halben Anteilwert gesunken.

Bei einem Betrieb mit verminderter Netzspannung sind zur Erzielung der gleichen Leistung entsprechend größere Ströme erforderlich. Damit wachsen auch die Kupferverluste. Dieser Nachteil wird aber dadurch aufgewogen, daß infolge der geringeren Eisensättigung auch die Blindleistung abnimmt. Bei dem Versuch am Kraftwerk stieg der Leistungsfaktor von 0,75 bei 80,7 kV auf 0,84 bei 69,0 kV effektiver Fernleitungsspannung, die Belastung betrug in beiden Fällen 50 vH. Die Blindleistung sank hierbei von 5410 auf 4430 kW, also um 18,1 vH.

Von dem Mittel der Spannungsherabsetzung läßt sich aber nicht immer ein ausreichender Gebrauch machen. So

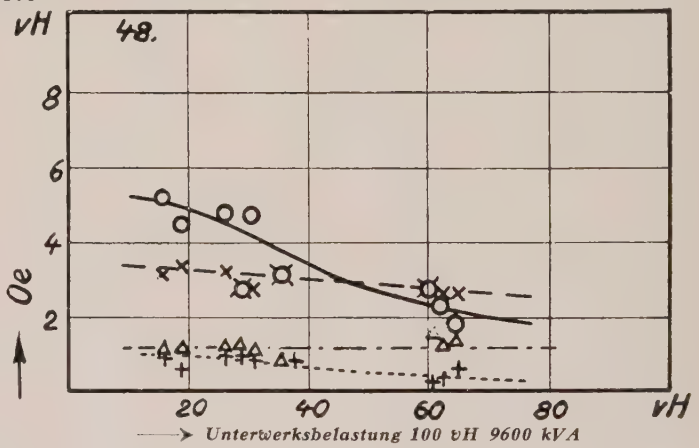


Bild 48. Spannungsoberwellen in der Fahrdrahtspannung des Betriebsnetzes, Fahrdrahtspannung = 88 vH, Meßstelle M 2.

würden beispielsweise im schlesischen Netz bei schweren Anfahrten in Breslau infolge des hohen Spannungsabfalles der Leitung Nieder Salzbrunn—Breslau Betriebsstörungen nicht ausbleiben, wenn man die Kraftwerksspannung so weit vermindert, daß eine merkliche Abnahme der Oberwellenamplituden eintritt.

3. Verbesserungsmaßnahmen an den Motoren.

Durch eine Herabsetzung der Netzspannung nimmt zwar der prozentuale Anteil derjenigen Oberwellen ab, die von den eisengesättigten Transformatoren herrühren, die Kurvenverzerrungen, welche in der Nutung oder Eisensättigung der Motoren ihre Ursache haben, bleiben jedoch bestehen. Diese lassen sich nur durch Änderungen an den Motoren verringern. Falls es der Platzmangel auf den Fahrzeugen oder die höheren Anschaffungskosten verbieten, schwachgesättigte Motoren zu verwenden, läßt sich bis zu einem gewissen Grade eine Verbesserung der Kommutierung durch Shuntung der Feldwicklung erzielen[22]). Als Parallelwiderstände haben sich bisher zur Unterdrückung der niederfrequenten Oberwellen am besten Drosselspulen besonderer Charakteristik bewährt. Von diesem Mittel wird im schlesischen Zugbetrieb bereits bei zwei Lokomotiven der Gattung 1 Do 1, Reihe 17, Gebrauch gemacht.

In einem früheren Abschnitt ist erwähnt worden, daß bei Lokomotiven mit mehreren Triebmotoren die höherfrequenten Oberwellen in der Regel geringere Amplitudenwerte erreichen als bei Fahrzeugen mit nur einem großen Motor. Hierbei spielt unter anderem auch die Art der Feldwicklung — ob Serien- oder Parallelschaltung — eine wichtige Rolle[22]), ferner die Zahnform, die Nutzahlen und die Art der Ankerwicklung. Einen entscheidenden Einfluß auf die Ausbildung der Nutenoberwellen hat schließlich die Größe des Luftspaltes. Bei vorhandenen Motoren konnte die Kommutierung durch nachträg-

[22] Vergl.: Töfflinger, Der Einphasen-Bahnmotor, Verlag Oldenbourg, S. 48/49.

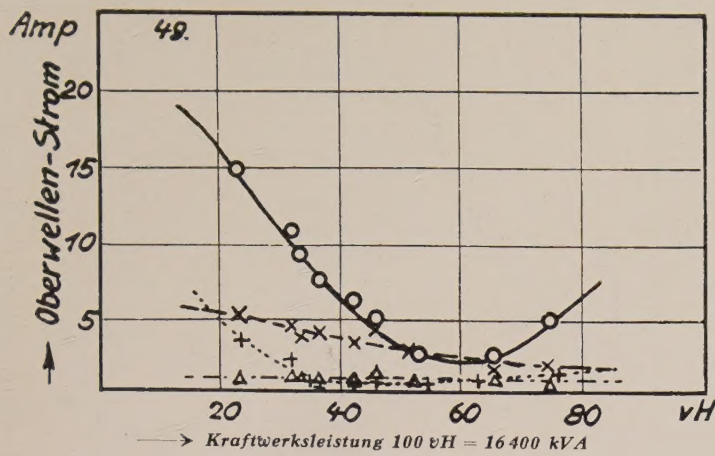


Bild 49. Oberwellenströme in der 80 kV-Sammelschiene des Kraftwerks, Fernleitungsspannung = 92 vH, Meßstelle M 1.

liches Abschleifen der Anker schon verschiedentlich verbessert werden[22]). Zur Unterdrückung der höherfrequenten Oberwellen ausgeführter Motoren besteht ein weiteres Mittel in der Parallelschaltung eines Ohmschen Widerstandes zur Feld-, Wendepol- oder überhaupt zur gesamten Statorwicklung[22]) [23]) [24]). Die Oberwellen höherer Frequenz sind selbst bei schräger Nutenanordnung in der Hauptsache auf Flußschwankungen infolge der Nutung zurückzuführen. Daneben entstehen infolge unrunden Ankers und infolge ungleichmäßiger magnetischer Leitfähigkeit des Ankereisens weitere Oberwellen, deren Frequenz ebenfalls von der Drehzahl abhängig ist. Diese lassen sich durch besondere Schichtung der Ankerbleche wirksam beseitigen[25]).

4. Die Aussiebung von Oberwellen.

Die niederfrequenten Oberwellenströme, welche als Folge hoher Eisensättigung auftreten, erzeugen Ohmsche und induktive Spannungsabfälle, die in der Netzspannungskurve als Spannungsoberwellen erscheinen. Gelingt es, diese Oberwellenströme durch entgegengesetzte Ströme entsprechender Frequenz aufzuheben, so muß auch die Spannungskurve, abgesehen von den Nutenoberwellen, wieder annähernd sinusförmig werden. Eine derartige Verkleinerung bzw. völlige Aufhebung der Oberwellenströme läßt sich durch geeignete Siebkreise erreichen, welche mittels Kondensator und Drosselspulen so abgestimmt sind, daß sie für die Grundwellenfrequenz einen möglichst hohen und für die gewünschte Harmonische einen geringen Widerstand haben.

Da die 3. Harmonische von allen Oberwellen stets die höchsten Spannungswerte erreicht, wäre ihre Beseitigung besonders wertvoll. Bevor auf die Wirkungsweise des Siebkreises näher eingegangen wird, soll zunächst festgestellt werden, welche Phasenlage die Ströme und Spannungen der 3. Oberwelle zueinander an verschiedenen Punkten des schlesischen Bahnnetzes und bei verschiedenen Belastungen haben.

In Bild 51 stellt die Kurve 1 eine Halbwelle des Spannungsverlaufes dar, der auf der 15 kV-Seite des Unterwerks Nieder Salzbrunn oszillographisch aufgenommen wurde. Die Belastung betrug hierbei 76,8 vH der vollen Unterwerksleistung. Bei der rechnerischen Analyse der Kurve 1 erhält man neben einer 5., 7., 9. Oberwelle usw., die hier aber unberücksichtigt bleiben sollen, ein Sinusglied, Kurve 2, und ein Cosinusglied, Kurve 3, der 3. Harmonischen. Der Deutlichkeit halber sind diese beiden Kurven in vierfacher Vergrößerung dargestellt. Durch geometrische Addition erhält man die Kurve 4, den Spannungsverlauf der 3. Oberwelle. Dieser ist auch bestimmt durch die Gleichung $y = A_3 \sin 3\alpha + B_3 \cos 3\alpha$. Hierin sind A_3 und B_3 die Scheitelwerte der Sinus- bzw. der Cosinuswelle der 3. Harmonischen, der Winkel α ist in elektrischen Graden der Grundwelle ausgedrückt. Differentiert man die Gleichung und setzt sie gleich Null, so erhält man

$$\frac{dy}{d\alpha} = A_3 \cdot 3 \cos 3\alpha - B_3 \cdot 3 \sin 3\alpha = 0$$

und daraus

$$\operatorname{tg}(3\alpha)_{max} = \frac{A_3}{B_3},$$

im vorliegenden Falle

$$= \frac{-20{,}2}{+13{,}7} = -1{,}475; \quad \alpha = -18^\circ 37'.$$

Damit ist auch der wieder in elektrischen Graden der Grundwelle ausgedrückte Winkel β bestimmt, da $\beta = 120^\circ$ minus dem absoluten Betrag von α ist, wie aus Bild 51 hervorgeht. Winkel β ist also hier $120^\circ - 18^\circ 37' = 101^\circ 23'$. Kurve 5 stellt die durch eine entsprechende Berechnung gefundene Grundharmonische dar.

Die Kurve 6 zeigt den Verlauf des Sammelschienenstromes, welcher der Fahrdrahtspannung um den Winkel φ nacheilt. Letzterer ist aus dem entsprechenden Oszillogramm entnommen und beträgt $36^\circ 54'$. Die Grundharmonische, Kurve 7, ist auch hier der Anschaulichkeit halber eingetragen. Kurve 8 stellt den aus der Sinus- und Cosinuswelle bereits zusammengesetzten Stromverlauf der 3. Harmonischen dar, und zwar in zehnfacher Vergrößerung. Sein Scheitelwert hat von dem Schnittpunkt der Stromkurve 6 mit der x-Achse den Winkelabstand γ. Letzterer ergibt sich aus dem Oszillogramm nach obigem Berechnungsverfahren zu $18^\circ 39'$. Damit ist der Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung der 3. Oberwelle (Kurve 4 und 8) bekannt. Er ist

$$\delta = \beta - \varphi - \gamma = 101^\circ 23' - 36^\circ 54' - 18^\circ 39' = 45^\circ 50'.$$

In vorliegendem Falle eilt also der Oberwellenstrom J_3 der Spannung U_3 um den Winkel $\delta = 45^\circ 50'$, oder in elektrischen Graden der 3. Harmonischen ausgedrückt, um $\delta_3 = 137^\circ 30'$ voraus, vgl. Bild 51 a. Die Nachrechnung zahlreicher anderer Oszillogramme ergab, daß der Winkel δ_3 mit zunehmender Unterwerksleistung größer wird und sich mit abnehmender Belastung dem Wert 90° nähert. Ein solcher Fall liegt vor, wenn das Unterwerk nur auf einen leerlaufenden Lokomotivtransformator arbeitet, vgl. Bild 4. Es konnte ferner festgestellt werden, daß auch an anderen Punkten des Fahrleitungsnetzes und auf der 80 kV-Seite des Kraftwerkes annähernd die gleichen Verhältnisse vorliegen, daß also der Oberwellenstrom J_3 der Spannung U_3 stets um einen Winkel vorauseilt, der je nach der Belastung zwischen 90° und 180° liegt.

Die obengenannten Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung der 3. Oberwelle lassen sich folgendermaßen erklären:

Der Einfachheit halber sei zunächst ein Netz mit nur einem einzigen Transformator untersucht. Der Generator liefere eine sinusförmige effektive Spannung U_1. Dann nimmt der leerlaufende Transformator infolge der Eisensättigung einen Magnetisierungsstrom mit spitzer Kurvenform auf, der sich in einen um etwa 90° nacheilenden Grundwellenstrom J_1 und einen Strom dreifacher Frequenz J_3 zerlegen läßt. An den Ohmschen und induktiven Widerständen von Generator und Zuleitung wird vom Oberwellenstrom ein Spannungsabfall E_3 erzeugt, der durch eine entgegengesetzt gerichtete Spannungskomponente aufgehoben werden muß. Sie habe den effektiven Wert U_3' und eile dem Strom J_3 um beispielsweise 70° voraus, vgl. Bild 52 a. Hierbei ist zu erwähnen, daß das Vektordiagramm der 3. Harmonischen dreimal so schnell rotierend zu denken ist wie das der Grundwelle. Der vom Grundwellenstrom J_1 erzeugte Spannungsabfall soll unberücksichtigt bleiben.

Betrachtet man nun die Spannungsverteilung in einem bestimmten Zeitpunkt, so ist nach Bild 52 b u_1 die sinusförmige Grundwellenspannung des verlustlosen Generators, u_3' die Spannungskomponente zur Deckung des Spannungsabfalles, und u_t die Netzspannung, gemessen auf der Primärseite des Transformators. In allen Fällen handelt es sich um Momentanwerte. Dann ist in jedem Augenblick $u_1 = u_3' + u_t$, oder $u_t = u_1 - u_3'$.

Die Spannungskomponente der 3. Harmonischen, die zur Deckung des Spannungsabfalles erforderlich ist, wird von der sinusförmigen Maschinenspannung geliefert. Man hat also deren Zeitwerte u_3' von den zugehörigen Spannungsgrößen u_1

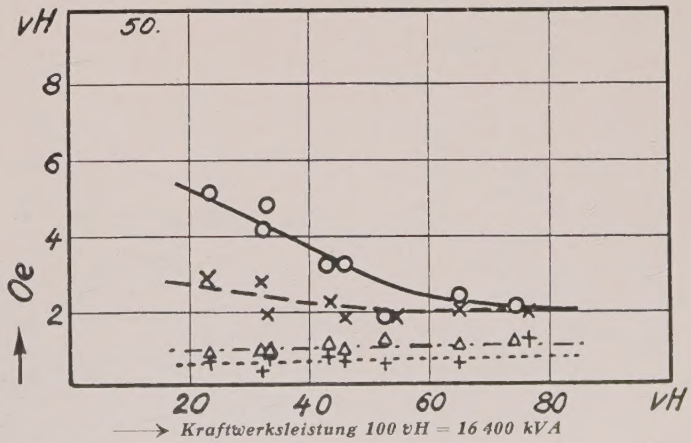


Bild 50. Spannungsoberwellen am Kraftwerk, Fernleitungsspannung = 92 vH, Meßstelle M 1.

[22]) Vergl.: Töfflinger, Der Einphasen-Bahnmotor, Verlag Oldenbourg, S. 48/49.
[23]) Vergl.: Heinrich, Das Bürstenproblem im Elektromaschinenbau, Verlag Oldenbourg, S. 126.
[24]) Vergl.: Töfflinger, Der Gleichstrom-Bahnmotor im Betrieb mit welliger Klemmspannung, Bergmann-Mitteilungen 1929, S. 267.
[25]) Vergl.: Euler, Beiträge zur oberwellenfreien Gleichstrommaschine, Archiv für Elektrotechnik 1930, Bd. 24, Heft 2, S. 241/246 und 249/256.

abzuziehen, um die Spannungskurvenform auf der Primärseite des leerlaufenden Transformators zu erhalten. Das ist in Bild 52c durchgeführt. Die Netzspannungskurve wird spitz, die in ihr enthaltene 3. Harmonische mit dem Effektivwert U_3 eilt dem Strom J_3 entsprechend obigem Beispiel um 110° nach und stimmt in Größe und Richtung mit der Spannung E_3 überein, vgl. Bild 52 a. Infolge der Streuspannungs- und der Ohmschen Verluste des Transformators ist die Spannungskurvenform auf der Sekundärseite noch spitzer. Das geht auch aus der Beziehung $u_t'' = u_1 - u_3' - u_3''$ hervor. Darin ist u_t'' der Zeitwert der Sekundärspannung und u_3'' die Komponente der 3. Harmonischen zur Deckung des Spannungsabfalles am Transformator, vgl. Bild 52 b. In diesem Zusammenhange sei erwähnt, daß sich im Gegensatz zum Transformator mit getrennten Wicklungen ein leerlaufender Spartransformator wie ein Spannungsteiler zu verhalten scheint, bei dem also die Kurvenformen auf Primär- und Sekundärseite übereinstimmen.

Die bisher betrachtete spitze Kurvenform des Magnetisierungsstromes hatte eine sinusartige Spannung am Transformator und einen ebensolchen Flußverlauf zur Voraussetzung. In Wirklichkeit wird aber diese Spannungskurve spitz und der Flußverlauf flach bis sattelförmig. Auch der Magnetisierungsstrom ändert sich, und zwar wird seine Kurvenform weniger spitz als bei sinusartiger Spannung. Die weitere Folge ist eine Verbesserung des Spannungsverlaufes und damit wieder ein Spitzerwerden des Magnetisierungsstromes, bis schließlich ein Gleichgewichtszustand eintritt.

Beim Einschalten weiterer leerlaufender Transformatoren in das untersuchte Netz wächst der im Generatorstromkreis fließende Oberwellenstrom; denn die hinzukommenden Ströme der 3. Harmonischen haben annähernd die gleiche Richtung wie der bereits vom ersten Transformator aufgenommene Strom J_3. Es muß also eine höhere Komponente U_3' aufgebracht werden, womit auch die Abweichung der Spannungskurve von der Sinusform zunimmt. Aus der übereinstimmenden Richtung der verschiedenen Magnetisierungsströme erklärt sich auch die annähernd gleichbleibende Größe der Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung der 3. Oberwelle bei Leerlauf, die durch Messungen an verschiedenen Punkten des Netzes festgestellt worden war.

Bei Belastung addieren sich geometrisch zu den Oberwellen der Transformator-Magnetisierungsströme weitere Oberwellenströme, die von der Eisensättigung der Lokomotivmotoren herrühren. Diese können bewirken, daß die Phasenverschiebung zwischen der Spannung U_3 und dem Strom I_3, welche bei Leerlauf etwa 100 bis 120° beträgt, jetzt Werte bis zu 180° erreicht, wie die Messungen im Betriebsnetz ergeben haben. Diese Tatsache ist für die später zu erläuternde Wirkung der Siebkreise wichtig, es seien daher die Gründe der Phasenwinkelvergrößerung durch die Motorstromoberwellen kurz gestreift. Der Oberwellenstrom hängt bekanntlich vom Magnetisierungsstrom ab,

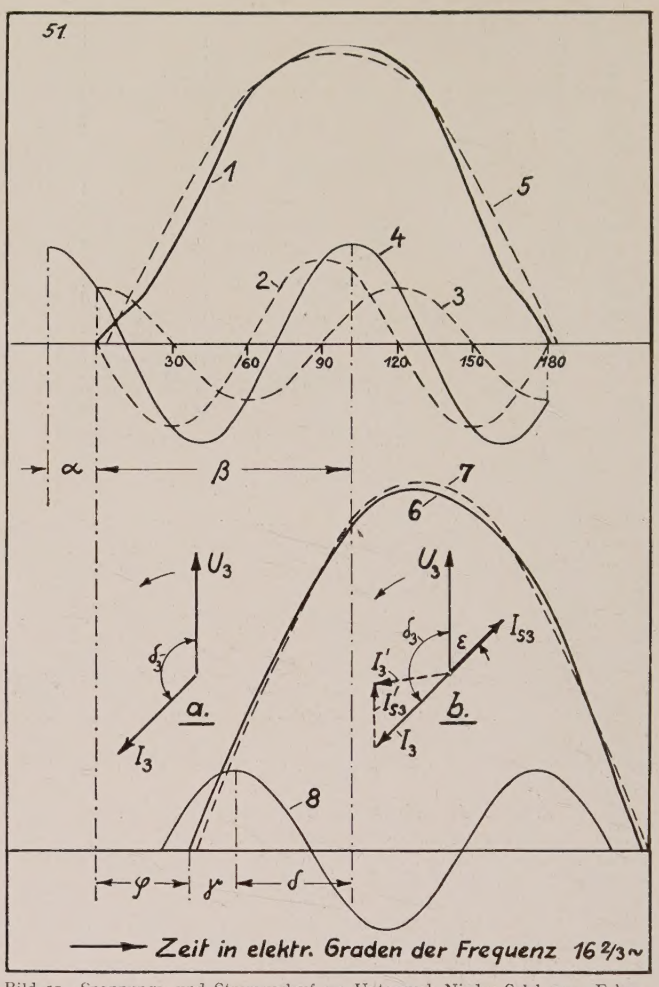


Bild 51. Spannungs- und Stromverlauf am Unterwerk Nieder Salzbrunn, Fahrdrahtspannung = 15,4 kV, Unterwerksbelastung = 76,8 vH.

auf dessen Richtung die Belastung ohne Einfluß ist, wenn es sich um einen Transformator handelt. Beim Reihenschlußmotor decken sich aber Magnetisierungs- und Arbeitsstrom, und da letzterer seine Richtung mit der Belastung und Drehzahl des Motors ändert, verschiebt sich auch die Phasenlage des von der Motormagnetisierung herrührenden Oberwellenstromes I_{m_3}. Der sich durch geometrische Addition aus dem Transformator-Oberwellenstrom I_{t_3} und dem Motor-Oberwellenstrom I_{m_3} ergebende Gesamtstrom I_3 ändert damit ebenfalls seine Lage gegenüber der in der Netzspannungskurve vorhandenen Oberwellenspannung U_3, und zwar wird der Phasenwinkel mit steigender Belastung und Drehzahl der Motoren größer. Nach diesen Erörterungen über die Größe der Phasenwinkel der 3. Harmonischen und ihre Beziehungen zur Netzbelastung wenden wir uns wieder den am Unterwerk Nieder Salzbrunn gemessenen Werten zu.

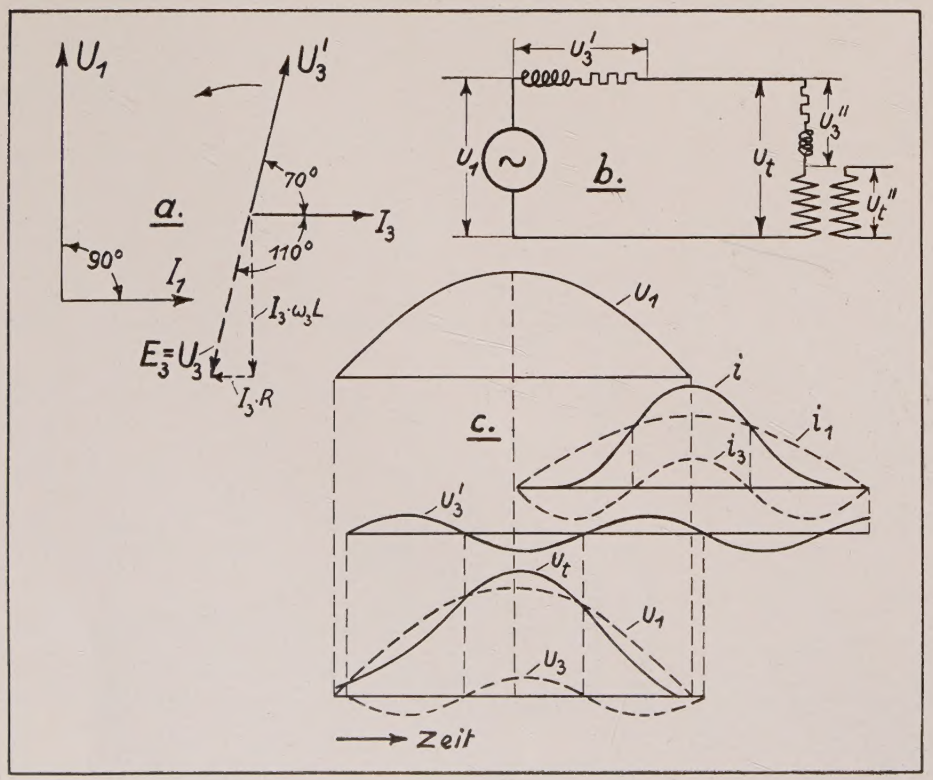


Bild 52. Schema der Kurvenformveränderung.

Bild 51 a zeigt das Vektordiagramm der 3. Harmonischen, das sich aus der oben durchgeführten Berechnung ergibt. Beim Einschalten eines Belastungswiderstandes würde die Spannung U_3 einen Strom hervorrufen, der eine Verkleinerung von J_3 zur Folge hätte. Aufgabe eines geeigneten Siebkreises ist es nun zu verhindern, daß außer der 3. Harmonischen noch der volle Grundwellenstrom über den Belastungswiderstand fließt.

Wird dem Siebkreis nur Wirkleistung entnommen, so ist der Siebkreisstrom J_{S_3}' in Phase mit der Spannung U_3. Der in der Zuleitung vom Kraftwerk bis zum Anschlußpunkt des Siebkreises fließende Oberwellenstrom J_3 läßt sich dann teilweise aufheben, vgl. Vektordiagramm b in Bild 51. Noch kleiner wird der Strom J_3, wenn der Siebkreisstrom J_{S_3} der Spannung U_3 um den Winkel ε nacheilt, was bei Entnahme einer entsprechend großen Blindleistung der Fall ist. Diese Phasenverschiebung ist durch Verstimmung des Siebkreises oder durch Änderung der Siebkreisbelastung zu erreichen. Es wäre zwar möglich, die Phasenverschiebung von der Netzbelastung abhängig zu machen, in den meisten Fällen dürfte es aber genügen, wenn sie für eine mittlere Belastung festgelegt wird. Soll der Siebkreis nur Wirkleistung abgeben, so wird die Rückwirkung auf den Strom J_3 um so günstiger, je höher die Belastung im Fahrleitungsnetz ist, da mit dieser der Winkel δ_3 wächst. Ähnliche Überlegungen gelten für die Verkleinerung von Strömen der 5. Harmonischen und weiterer Oberwellen niedriger Frequenz.

Es bleibt noch die Frage zu beantworten, ob der Siebkreisstrom nutzbringend verwertet werden kann. Da der Bahnstrom wegen seiner geringen Frequenz von $16^2/_3$ Hz in normalen Glühlampen ein starkes Flimmern erzeugt, läßt er sich für Beleuchtungszwecke nicht unmittelbar verwenden. Dieser Bedarf kann durch die erwähnten Siebkreisanlagen gedeckt werden, deren Ströme infolge der höheren Frequenz flimmerfreies Licht erzeugen[26]). Die Ersparnisse, die hierbei gegenüber dem Fremdbezug von 50 periodigem Strom eintreten, versprechen im schlesischen Netz recht beträchtlich zu werden. Daneben besteht natürlich auch die Möglichkeit, den Siebkreisstrom für Heizungszwecke, ferner zum Antrieb stationärer Einphasen- und vorhandener Drehstrommotoren zu verwenden, wenn man bei letzteren eine Hilfsphasenschaltung mittels Drosselspule oder Kondensator vorsieht.

Die Ohmsche Dämpfung, die Frequenzschwankungen im Bahnnetz und die Verstimmung des Siebkreises können es mit sich bringen, daß neben der gewünschten Frequenz auch ein Anteil der Grundwelle im Siebkreisstrom vorhanden ist. Durch geeignete Abstimmung des Siebkreises läßt sich erreichen, daß dieser Grundwellenstrom eine voreilende Phasenverschiebung hat und so den Leistungsfaktor des Bahnnetzes verbessert.

[26]) Vergl.: Kasperowski, Die Verwertung von Oberwellen des Bahnstromes zu Beleuchtungszwecken, Elektrische Bahnen 1931, S. 277.

Schluß.

Die vorliegende Untersuchung zeigt, daß im Netz der schlesischen Gebirgsbahnen erhebliche Verzerrungen der Strom- und Spannungskurven auftreten, die hauptsächlich durch die hochgesättigten Transformatoren und Motoren der Triebfahrzeuge verursacht werden. Diese Abweichungen von der Sinusform haben sehr ungünstige Einflüsse auf die Leistung und Kommutierung der Motoren und können zu empfindlichen Störungen mannigfacher Art führen. Bei vorhandenen Anlagen besteht die Möglichkeit, durch Senken der Netzspannung, durch Shuntung der Motoren und durch Verwendung von Siebkreisen die elektrischen Verhältnisse zu verbessern. Bei neu zu beschaffenden Lokomotiven wird man aber gut tun, die Ausnutzung des aktiven Eisens der Transformatoren und Motoren nicht zu hoch zu treiben, besonders wenn diese Fahrzeuge für Strecken mit sehr dichter Zugfolge oder starken Steigungen bestimmt sind.

An dieser Stelle möchte ich nicht verfehlen, den Herren Professoren Dr.-Ing. Hilpert und Dr.-Ing. Euler für das große Interesse, das sie der vorliegenden Arbeit entgegengebracht haben, und für ihre freundlichen Bemühungen meinen herzlichsten Dank auszusprechen. Auch der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft bin ich zu großem Dank verpflichtet, besonders Herrn Ministerialrat a. D. Reichsbahndirektor Dr.-Ing. eh. Wechmann, der die Messungen im schlesischen Bahnnetz veranlaßt und die Anregung zu dieser Dissertation gegeben hat. Ferner gebührt Dank der Reichsbahndirektion Breslau, dem Reichsbahn-Zentralamt, dem Kraftwerk Mittelsteine, dem Maschinenamt Hirschberg, den weiteren Dienststellen und allen ihren Herren, die zum Gelingen der Versuche beigetragen haben. Schließlich danke ich herzlich Herrn Dipl.-Ing. Curtius, dessen große Erfahrung den Erfolg der zum Teil recht schwierigen meßtechnischen Arbeiten gesichert hat.

H. S. Hermann G. m. b. H., Berlin SW 19

Lebenslauf

Am 16. November 1901 wurde ich in Rosenberg O/S als Sohn des Bürgermeisters Eugen Kasperowski geboren. Nach Ablegung der Reifeprüfung am Staatsgymnasium in Kreuzburg studierte ich an der Technischen Hochschule Breslau, wo ich im März 1926 das Diplomexamen machte. Anschließend trat ich bei der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft als Regierungsbauführer ein. Während der Ausbildungszeit war ich hauptsächlich im elektrischen Zugbetrieb tätig und hatte auch Gelegenheit ein halbes Jahr als Konstruktionsingenieur bei den Bergmann-Elektrizitätswerken arbeiten zu können. Im März 1929 legte ich die Staatsprüfung ab und wurde zum Regierungsbaumeister ernannt. Nach einer halbjährigen Tätigkeit bei den Siemens-Schuckert-Werken in Berlin wurde ich als Reichsbahnbaumeister zum Reichsbahn-Maschinenamt Hirschberg einberufen. Seit Januar 1931 bin ich als Hilfsarbeiter des Dezernenten für elektrische Zugförderung bei der Reichsbahndirektion Breslau tätig.